

Mise au point

Pathologie traumatique de la membrane interosseuse de l'avant-bras Traumatic pathology of antibrachial interosseous membrane of forearm

Marc Soubeyrand^a, Clarisse Lafont^b, Renaud De Georges^c, Christian Dumontier^{d,*}

^a Service d'orthopédie, hôpital du Kremlin-Bicêtre, 78, rue du Général-Leclerc, 94270 Le Kremlin-Bicêtre, France

^b Service de radiologie, hôpital Tenon, 4, rue de-la-Chine, 75020 Paris, France

^c Clinique Pasteur, 294, Boulevard du Général-de-Gaulle, 07500 Guilhaud-Granges, France

^d Service d'orthopédie SOS Mains, hôpital Saint-Antoine, 184, rue du Faubourg-Saint-Antoine, 75571 Paris cedex 12, France

Résumé

La membrane interosseuse (MIO) antébrachiale reste une structure mal connue. Elle est tendue sur environ 10,6 cm entre les crêtes interosseuses du radius et de l'ulna. Elle présente un aspect en mailles avec des fibres tendues de l'ulna vers le radius et de haut en bas, et des fibres tendues de bas en haut entre l'ulna et radius. La bande centrale, qui représente la portion moyenne des fibres tendues de bas en haut, est la structure la plus importante fonctionnellement et sa composition est intermédiaire avec celle d'un ligament. Le rôle de la membrane interosseuse est double : elle stabilise transversalement les deux os de l'avant-bras et stabilise longitudinalement les deux os de l'avant-bras en transférant les forces transmises au radius par le poignet vers l'ulna. La transmission de ces forces varie en fait en fonction de la position de pronosupination, de la position en varus ou valgus du coude et de l'orientation du poignet rendant l'interprétation des données expérimentales difficiles. L'avant-bras forme un tout et l'ensemble de membrane interosseuse et diaphyse des deux os peut être assimilé à une articulation radio-ulnaire moyenne, intercalée entre les radio-ulnaires proximale et distale. L'ensemble de ces articulations ou verrous agit en synergie pour stabiliser l'avant-bras et optimiser la répartition des contraintes. La perte fonctionnelle d'un verrou, a fortiori de plusieurs, va retentir gravement sur la fonction. Le syndrome d'Essex-Lopresti, qui correspond à la déstabilisation des trois verrous, représente la forme la plus sévère des déstabilisations de l'avant-bras.

L'imagerie de la membrane interosseuse est difficile même si l'imagerie par résonance magnétique (IRM) permet d'obtenir des images statiques, perturbées le plus souvent par les nombreux artefacts liés au traumatisme et au matériel chirurgical. L'échographie dynamique permet de visualiser les lésions de la membrane interosseuse et devrait s'affirmer comme un examen indispensable pour aider le clinicien.

Le traitement chirurgical dépend de l'importance des lésions des différents verrous. La reconstruction de la membrane interosseuse reste le geste le plus difficile et les différentes ligamentoplasties proposées n'arrivent pas à répondre à toutes les contraintes biomécaniques. Nous proposons une ligamentoplastie chirurgicale basée sur la biomécanique de la membrane interosseuse et dont la faisabilité a été validée par des études cadavériques. Les premiers cas réalisés semblent prometteurs.

© 2007 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

The antibrachial interosseous membrane (IOM) is taught over an average length of 10.6 cm between the diaphyses of the radius and ulna bone. It looks like a stitch with fibers running from the ulna to the radius and from proximal to distal and fibers running from distal to proximal. The central band, which is the middle part of the fibers directed from distal to proximal has mechanical properties similar to those of a ligament and act as a ligamentous structure embedded in the larger membranous complex of the IOM. The interosseous membrane has a double function: it stabilizes transversally the forearm's two bones and stabilizes longitudinally the two bones by transferring loads from the radius to the ulna. Load transmission varies according to the pronosupination position, the varusvalgus constraints on the elbow and the inclination of the wrist, making interpretation of the experimental data difficult.

* Auteur correspondant. Institut de la main, 6, square Jouvenet, 75016 Paris, France.

Adresse e-mail : ch.dumontier@gsante.fr (C. Dumontier).

One should consider the forearm as a whole and the interosseous membrane with the two diaphyses should be regarded as a middle radio-ulnar joint, intercalated between the proximal and distal radio-ulnar joint. Those three articulations or links between radius and ulna act synergistically to stabilize and optimize repartition of loads. Functional loss of one of these links, and of course of more than one, will severely modify the forearm function. Essex-Lopresti lesion, which represents the functional loss of all three links, is the most destabilizing forearm lesion.

Imaging of the interosseous membrane is difficult. MRI allows for static imaging of the interosseous membrane but there are often artifacts due to previous trauma or surgical procedures. Dynamic sonography helps to visualize all the lesions and will probably be part of the evaluation of every severe forearm injury.

Surgical treatment depends on the gravity of the lesions of the different links. Interosseous membrane reconstruction is still the most difficult technique and most of the previously reported ligamentoplasties cannot answer all the biomechanical constraints. We describe a ligamentoplasty based on the biomechanics whose technique has been validated by cadaveric experiments. First surgical cases are promising.

© 2007 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Membrane interosseuse antébrachiale ; Ligament interosseux ; Essex-Lopresti ; Pronation ; Supination ; Fractures de Monteggia ; Traumatismes de l'avant-bras ; Biomécanique

Keywords: Antibrachial interosseous membrane; Interosseous ligament; Essex-Lopresti; Pronation; Supination; Monteggia fractures; Forearm injuries; Biomechanics

1. Introduction

La membrane interosseuse (MIO) de l'avant-bras est une structure dont on découvre depuis peu sa physiologie, complexe, et sa pathologie, sous-estimée et intriquée avec les lésions du coude et/ou du poignet. Elle n'a été connue pendant longtemps que par son rôle passif de contenant des loges de l'avant-bras et par sa participation indirecte aux

syndromes de loges qui touchent préférentiellement les muscles profonds s'insérant partiellement sur la MIO comme le *flexor pollicis longus* et les *flexor digitorum profundus* [1]. Son rôle n'est cependant pas majeur, la simple section de l'aponévrose antérieure de l'avant-bras étant expérimentalement suffisante pour décompresser les loges antérieures et postérieures [2,3], même si des controverses persistent, notamment pour le *pronator quadratus* [4,5]. La première description clinique

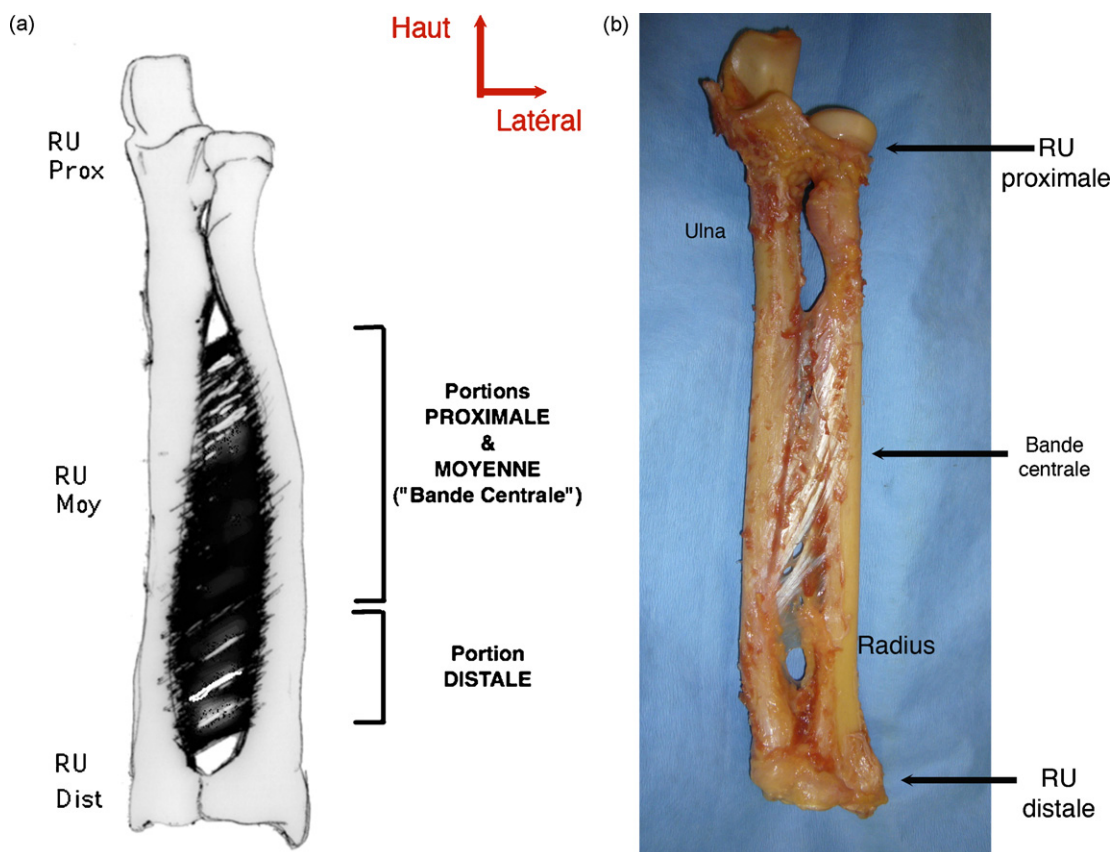


Fig. 1. (a et b) : vue antérieure d'un avant-bras gauche. La membrane interosseuse occupe l'espace entre les articulations radio-ulnaires proximales et distales. Les fibres obliques en haut et en dehors de la membrane interosseuse sont divisées en trois portions proximale, moyenne et distale, et forment en association avec les diaphyses des deux os, l'articulation radio-ulnaire moyenne. RU : articulation radio-ulnaire.

d'une lésion de la MIO fut faite par Curr et Coe en 1946 [6], quelques temps avant la publication d'Essex-Lopresti [7]. On s'est progressivement aperçu que la MIO joue un rôle mécanique essentiel dans la stabilité de l'avant-bras et dans la pronosupination. Avec les articulations radio-ulnaires proximale et distale, elle représente le troisième verrou dynamique de l'avant-bras, véritable clé de voûte fonctionnelle intercalée entre le poignet et le coude. Sa pathologie pose des problèmes diagnostiques et thérapeutiques importants. La bibliographie concernant la MIO s'est rapidement enrichie ces dernières années, mais de nombreux points restent à élucider concernant aussi bien sa physiologie, sa pathologie que ses modalités thérapeutiques.

2. Anatomie et biomécanique de la MIO

2.1. Anatomie descriptive

La MIO est une structure dont l'anatomie a été récemment précisée [8,9]. Elle est tendue entre les crêtes interosseuses du radius et de l'ulna. On distingue deux groupes de fibres selon leur orientation de l'ulna vers le radius : des fibres orientées en haut et en dehors (de bas en haut et de l'ulna vers le radius) et d'autres orientées en bas et en dehors (de haut en bas et de l'ulna vers le radius). Les fibres orientées en haut et en dehors sont les plus importantes du point de vue de leur structure et de leur fonction. L'association de ces deux groupes de fibres donne un aspect en « mailles » lié au croisement des fibres. La longueur moyenne de la MIO est de 10,6 cm [10].

On décrit aux fibres dirigées en haut et en dehors, qui sont les plus importantes, nous le reverrons, en trois parties : une partie proximale et une partie distale qualifiées de membraneuses, et

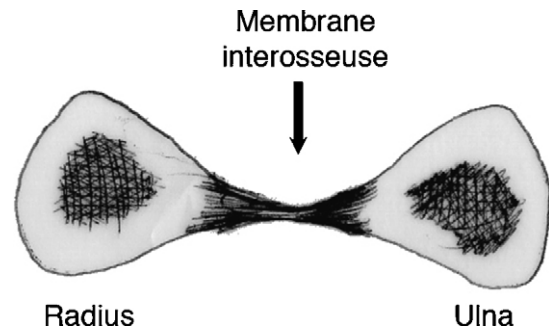
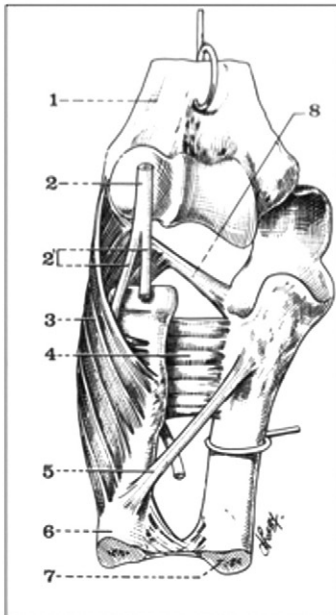


Fig. 2. Avant-bras gauche, vue par en dessous. Coupe transversale de l'avant-bras montrant la variation d'épaisseur de la MIO et son insertion sur les crêtes interosseuses des deux os.

une partie centrale dite ligamentaire (Fig. 1). Les portions membraneuses sont constituées de plusieurs bandes qualifiées d'accessoires. La portion ligamentaire est appelée bande centrale et correspond schématiquement au tiers moyen de la MIO. La bande centrale ainsi que les bandes accessoires sont retrouvées chez tous les spécimens par Skahan et al. [8]. Seul le nombre de bandes accessoires est variable. La bande centrale est la région la plus épaisse et celle où la résistance mécanique est la plus grande au sein de la MIO ; sa rigidité est de 13,1 plus ou moins 3,0 N/mm, son module est de 608,1 plus ou moins 160,2 mPa, son étirement au moment de la rupture est de 9,0 plus ou moins 2,0 % [11]. Elle est aussi rigide qu'un ligament croisé antérieur et possède les deux tiers de sa solidité, et elle est sept fois plus rigide que le *flexor carpi radialis* [11,12]. La bande centrale fait environ 17 mm de large. La bande centrale fait 11 à 26 mm de large quand on la mesure perpendiculairement à ses fibres et 27 à 35 mm quand elle est mesurée

(a)



D'après Testut et Latarjet :
vue antérieure du muscle
supinateur montrant la corde
oblique (5)

1. Extrémité inférieure de l'humérus
2. Nerf radial
- 2'. Branches antérieure et postérieure du nerf radial
3. Faisceau superficiel du supinateur
4. Faisceau profond du supinateur
5. Corde de Weitbrecht
6. Radius
7. Ulna
8. Faisceau moyen du ligament latéral externe

(b)

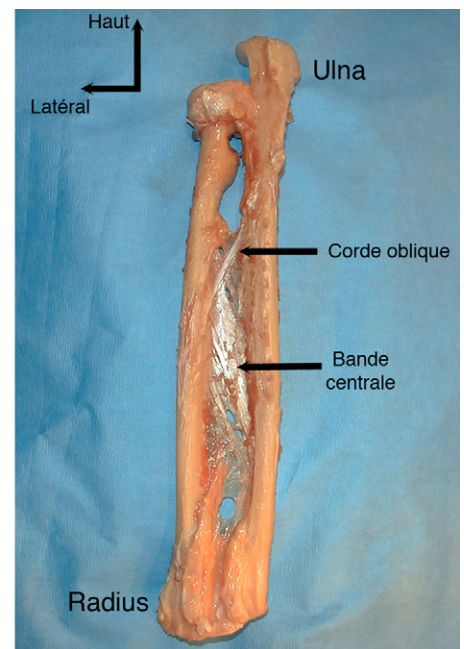


Fig. 3. (3a) : représentation schématisée : sur ce dessin représentant le muscle *supinateur* la corde oblique apparaît tendue entre ses deux insertions sur le radius (en dessous) de la tubérosité bicipitale et la partie médiale du processus coronoïdien de l'ulna. (3b) : vue anatomique postérieure d'un avant-bras gauche : la corde oblique est bien visible, de même que la bande centrale, dans un plan plus antérieur.

perpendiculairement à l'axe de l'avant-bras selon les auteurs [8,13]. Chandler et al. ont détaillé les repères anatomiques de la bande centrale [14]. Elle s'insère environ à mi-hauteur sur le radius (à 57 % de la hauteur du radius en partant de l'épiphyse distale pour Tomaino, soit à 7,7 cm de la tête radiale pour Shaken) et à la jonction un tiers inférieur à un tiers moyen sur l'ulna (32 % pour Tomaino, soit 13,2 cm de la pointe de l'olécrane), formant ainsi un angle d'environ 20–25° par rapport à l'axe ulnaire [8,15]. L'épaisseur de la MIO est donc variable selon la hauteur : elle est fine, voire pellucide à sa partie basse, tandis que son épaisseur maximale se situe environ à son tiers moyen (bande centrale). Dans le plan transversal, la MIO est plus épaisse au niveau de ses zones d'insertion osseuse et s'amincit à mi-distance entre les deux os (Fig. 2). Mc Ginley et al. ont évalué avec des mesures Laser et imagerie par résonance magnétique (IRM), l'épaisseur moyenne de la bande centrale de la MIO à 2,18 mm plus ou moins 0,20 [16]. La MIO est légèrement plus épaisse sur le versant radial.

Les fibres dirigées en bas et en dehors sont moins importantes. Deux structures ont été individualisées en leur sein (Fig. 3) : la corde oblique et la bande proximale. La corde oblique (*chorda obliqua* ou ligament de Weitbrecht) prend son origine au bord latéral du processus coronoïde et rejoint le radius immédiatement en dessous de la tubérosité bicipitale du radius. Elle est légèrement plus épaisse que le reste de la MIO avec des valeurs comprises entre 2,2 mm et 3,5 mm [16]. La bande proximale est une structure inconstante.

Histologiquement, les fibres de la MIO prolongent le périoste du radius et de l'ulna. La composition de la MIO associe essentiellement du collagène (entre 60 et 90 %, organisé en fibres parallèles) et des fibres d'élastine. La concentration en collagène est plus importante dans les régions proximale et moyenne [15,17]. La bande centrale possède les caractéristiques intermédiaires entre un ligament et une membrane, avec près de 84 % de collagène [17]. Une microvascularisation est présente, plus importante à proximité des crêtes d'insertion osseuse. Cette vascularisation se raréfie en se rapprochant du milieu de la membrane. Avec l'âge, ce sont surtout la vascularisation et les propriétés mécaniques de la MIO qui se modifient : la vascularisation s'appauvrit, surtout au milieu de l'espace interosseux, tandis que la rigidité des fibres diminue [18]. La MIO sert à l'insertion musculaire de certains muscles de la loge antérieure (*flexor digitorum profundus*, *flexor pollicis longus*) et de la loge postérieure (*extensor pollicis longus*, *abductor pollicis longus*, *extensor indicis proprius*) qui pourraient avoir un rôle dans sa tension physiologique [19]. Cette tension de la MIO par les muscles de l'avant-bras pourrait ainsi expliquer les résultats différents observés sur la tension de la bande centrale entre Nakamura (in vivo) et d'autres auteurs (sur cadavres) [8,20,21]. En distal, la MIO forme une partie de la face postérieure du compartiment du *pronator quadratus* dont le fascia superficiel s'insère sur la MIO de façon étanche, ne laissant passer que le pédicule interosseux antérieur [5]. La MIO entretient des rapports étroits avec le paquet interosseux antérieur qui longe sa face antérieure, et avec l'artère interosseuse postérieure, branche de l'artère ulnaire, qui traverse la MIO à sa partie supérieure passant entre le bord

supérieur de la bande centrale et la corde oblique (Fig. 4). L'innervation et la vascularisation de la MIO dépendent des paquets interosseux [10]. Son innervation, mal précisée, et les rapports étroits qu'elle entretient avec les muscles de la loge profonde de l'avant-bras pourrait faire de la MIO un récepteur proprioceptif permettant d'adapter la tension des muscles de l'avant-bras.

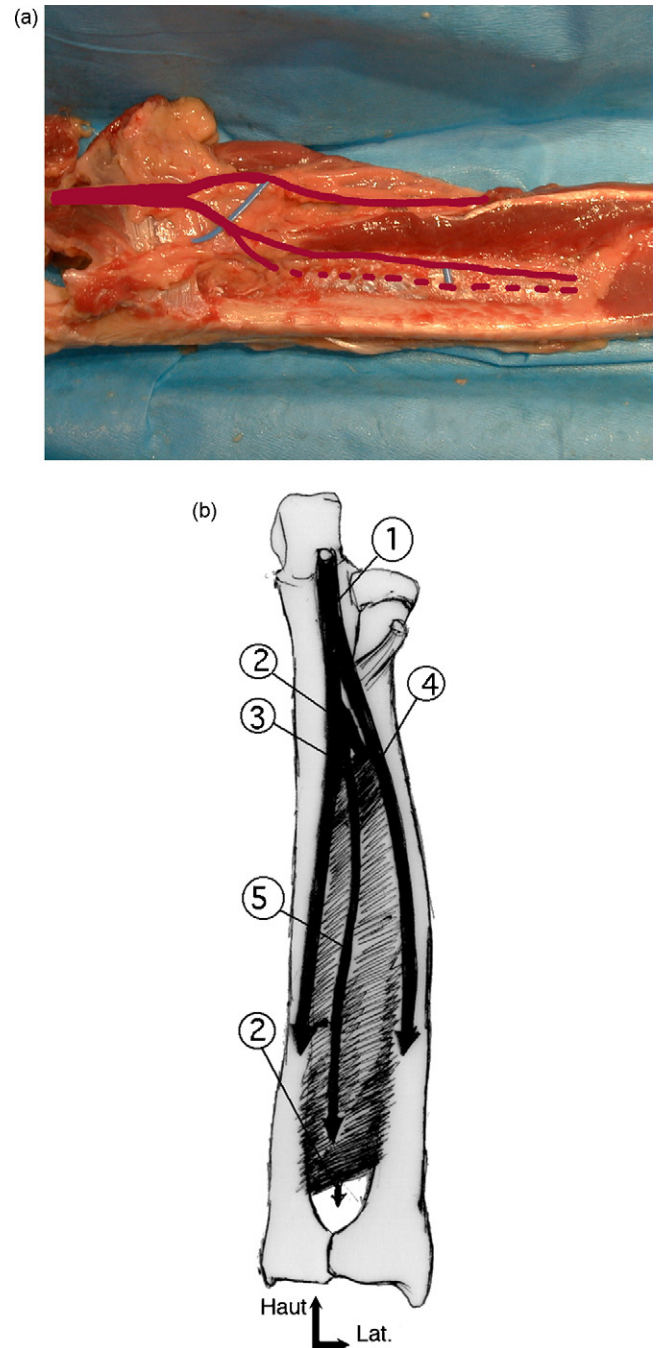


Fig. 4. Rapports vasculaires de la MIO (vue antérieure d'un avant-bras gauche). (4a) : l'artère interosseuse antérieure court à la face antérieure de la MIO avant de s'engager dans le *m. pronator quadratus*. (4b) : représentation schématique des rapports vasculaires. 1 = artère brachiale ; 2 = artère interosseuse postérieure ; 3 = artère ulnaire ; 4 = artère radiale ; 5 = artère interosseuse antérieure qui court sur la face antérieure de la MIO.

2.2. Biomécanique de la MIO

La physiologie de la MIO fait intervenir des composants passifs (les deux os de l'avant-bras et les fibres de la MIO) et actifs (les muscles). La MIO est composée d'un ensemble de fibres avec une composition en collagène très importante proche de celle des ligaments. Chaque fibre est donc l'équivalent d'un ligament. Un ligament est une structure inextensible qui n'est fonctionnelle que lorsqu'on la met en tension (un ligament détendu n'est pas fonctionnel). La tension d'un ligament dépend directement de la distance spatiale qui sépare ses deux points d'insertion. Chaque fibre de la MIO s'insère sur le radius d'un côté et sur l'ulna de l'autre. Le radius et l'ulna ne sont pas des os rectilignes, et l'importance de leur géométrie (courbure pronatrice et supinatrice du radius...), et la gravité des cals vicieux qui peuvent les affecter, est bien connue [22–25]. Durant la rotation du radius autour de l'ulna, la géométrie des deux os fait que la distance entre les points d'insertion des fibres de la MIO varie : certains points se rapprochent (les fibres se détendent), tandis que d'autres s'éloignent (les fibres se tendent). Ce phénomène dynamique

provoque un recrutement progressif des fibres de la MIO lors de la prono-supination (Fig. 5).

Les fibres les plus importantes mécaniquement sont obliques de bas en haut et de l'ulna vers le radius. Le vecteur de force qu'induit la mise en tension d'une de ces fibres est parallèle à cette fibre. Ce vecteur oblique est la somme d'un vecteur vertical (stabilité verticale) et d'un vecteur transversal (stabilité transversale) [26,27]. La composante verticale du vecteur lutte donc contre l'ascension du radius (stabilité verticale), tandis que la composante horizontale lutte contre l'éloignement radio-ulnaire (stabilité transversale) (Fig. 6). Le vecteur force, induit par les fibres orientées en bas et en dehors, participe aussi aux stabilités verticale et transversale, mais à un moindre degré. L'observation de préparations anatomiques ainsi que les données de la littérature permettent de dire que, selon le degré de prono-supination, les secteurs de la membrane qui sont tendus et donc fonctionnels ne sont pas les mêmes [20,21,28–32]. Il existe un phénomène de recrutement des fibres au cours de la prono-supination. Dans son ensemble, la MIO est légèrement plus tendue en supination qu'en pronation. En revanche, lorsque l'on considère séparément les différents

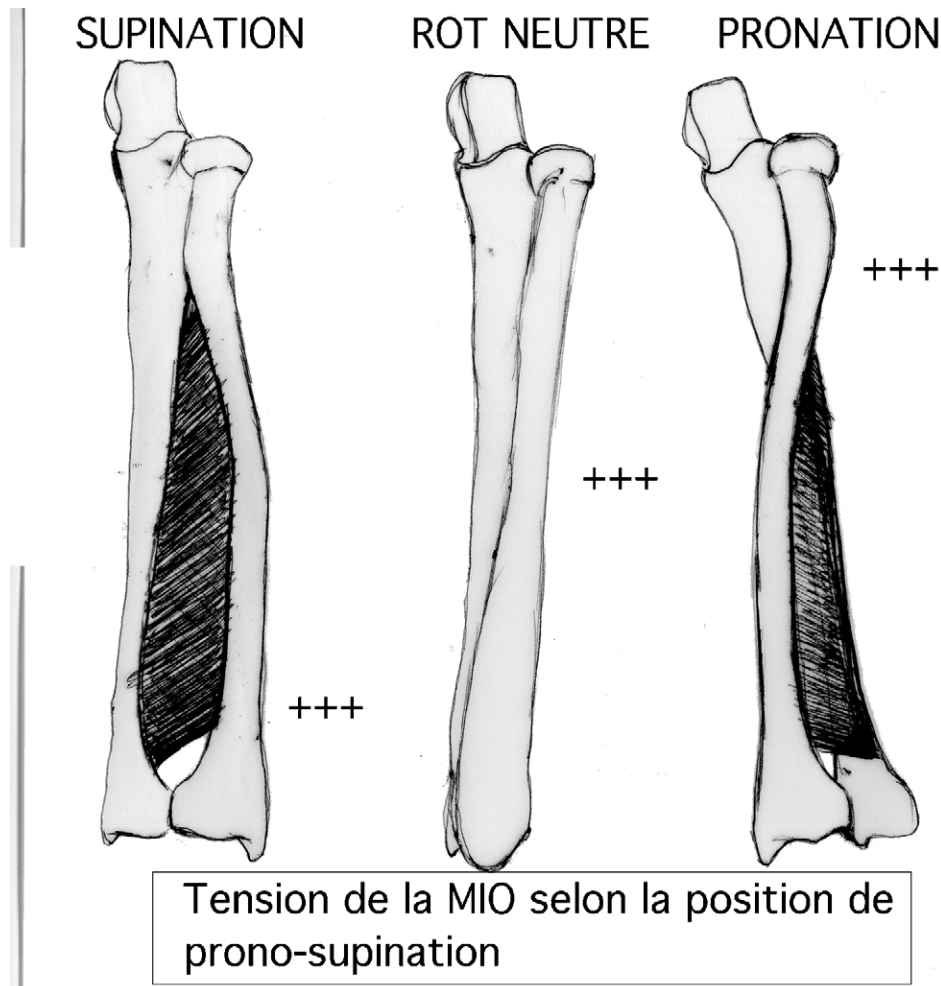


Fig. 5. Mise en tension de la MIO selon les mouvements de prono-supination. La portion proximale de la MIO est en tension maximale lors de la pronation, tandis que la partie distale se tend surtout en supination.

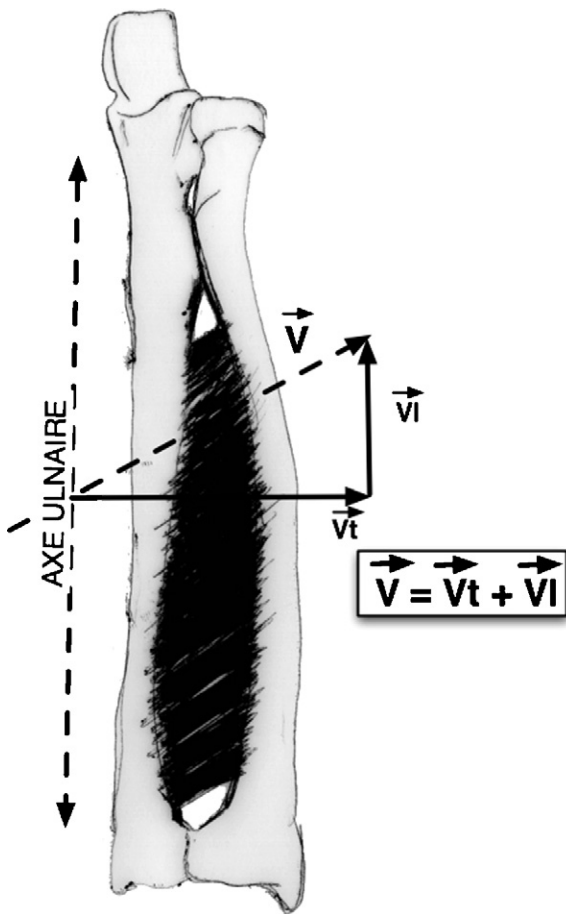


Fig. 6. Les vecteurs de force au niveau de la MIO. La MIO participe aux stabilités transversale et longitudinale. Si l'on considère le vecteur (V) qui matérialise la tension véhiculée par chacune des fibres de la MIO, celui-ci se décompose en un vecteur transversal (V_t) et un vecteur longitudinal (V_l) qui correspondent respectivement aux composantes de stabilité transversale et longitudinale.

secteurs de la MIO, on se rend compte que chacun a un comportement spécifique. La portion proximale est en tension maximale lors de la pronation. La bande centrale est en tension maximale lors de la rotation neutre. La portion distale est en tension maximale lors de la supination. Ainsi, en association avec les articulations radio-ulnaires proximale et distale, la MIO contribue à réguler et harmoniser la prono-supination.

La mise en tension des fibres orientées en haut et en dehors aura pour effet de transmettre à l'ulna les charges qui montent depuis l'extrémité distale du radius vers l'extrémité proximale du radius. Quand elle est mise en contraintes longitudinales, la MIO se rompt deux fois sur trois en son milieu (partie la plus fine) pour un étirement de 10,34 plus ou moins 2,46 mm [11]. Ce transfert de charges longitudinales qui se produit entre le poignet et le coude a été étudié par plusieurs auteurs et repose en très grande partie sur la bande centrale [8,12,13,33–39]. Il en ressort que, lorsque l'on soumet le poignet à une force longitudinale, celle-ci est transmise à l'avant-bras via le complexe radio-ulno-carpien (Fig. 7). La majorité de cette force passe par la radio-carpienne (de 60 % à 94 % selon le degré d'inclinaison, de flexion-extension du poignet et de rotation de l'avant-bras), le reste passant par l'ulno-carpienne.



Fig. 7. Transmission de contraintes axiales. La transmission des contraintes longitudinales est assurée essentiellement par le radius (80 % environ, avec des variations expliquées dans le texte) au niveau du poignet et par l'ulna au niveau du coude (60 % environ, mêmes remarques que précédemment). La différence entre la répartition radio-ulnaire des contraintes est liée à la transmission de charge par la MIO.

Au coude, la répartition du transfert de charge est largement modifiée, voire inversée, avec environ 60 à 70 % de la force qui transite par l'huméro-ulnaire contre 30 % par l'huméro-radiale. L'important est de retenir que physiologiquement, au niveau du poignet, c'est le radius qui transmet la majorité des contraintes longitudinales, tandis qu'au niveau du coude, c'est l'ulna. Ces valeurs ne sont que des estimations et elles varient en fonction de la position du poignet (flexion–extension, inclinaison ulnaire ou radiale), de la rotation de l'avant-bras et de la position du coude (flexion–extension, valgus–varus). Le transfert de charge du radius vers l'ulna est d'autant plus important que le coude, soit en varus (absence de contact de la tête radiale), que l'avant-bras est en supination et que le poignet est en inclinaison radiale [36,40,41]. Ce transfert de charges est plus important en pronation quand la tête radiale est réséquée, plus important en position neutre quand elle est intacte [8,26,38]. La résection isolée de la tête radiale permettait une ascension du radius de 7 mm dans le travail de Rabinowitz, la section de la MIO n'apportant pas de réels changements [42]. Dans ce même travail, la section isolée de la MIO ou du complexe triangulaire du poignet (TFCC) n'avait pas d'influence mesurable sur la migration supérieure du radius quand la tête radiale était intacte ; à l'inverse la section associée des deux structures entraînait une migration proximale majeure du radius dont la tête venait en contact avec le capitulum. On notera aussi le parallélisme qu'il y a entre le volume de chacune des quatre épiphyses (ulna et radius proximaux et distaux) et l'importance des contraintes qu'elles véhiculent : les têtes ulnaire et radiale transmettent moins de contraintes et ont un volume moins important que les épiphyses radiale distale et ulnaire proximale. Ce transfert de charge s'opère à travers les différentes articulations radio-ulnaires, via les ligaments qui les unissent. En distal, c'est surtout le TFCC qui intervient, alors qu'au niveau moyen, c'est la MIO. Pour Hotchkiss, une fois la tête radiale réséquée, le tiers moyen de la membrane interosseuse véhiculait 71 % des contraintes contre 8 % pour le complexe ligamentaire radio-ulnaire ou TFCC [13]. Tejjwani et al. ont prouvé que lorsque la MIO était sectionnée, l'intégralité des forces verticales transmises au extrémité distale du radius étaient retrouvées au extrémité proximale du radius [35]. Il n'y a pas de transfert de charges entre le radius et l'ulna lorsque la MIO est détruite [12,34,43] (Fig. 8).

Enfin, la compression axiale de l'avant-bras a également tendance à déformer les os de l'avant-bras [44]. La composante transversale de la MIO limite l'écartement des articulations radio-ulnaires et la courbure des os de l'avant-bras, en augmentant du coup les contraintes axiales [26,34].

2.3. Le concept d'articulation radio-ulnaire moyenne

L'anatomie fonctionnelle de la MIO est intimement liée à celle de l'avant-bras. On décrit classiquement deux articulations radio-ulnaires : une proximale et une distale. L'articulation radio-ulnaire proximale se compose de la tête radiale, de l'incisure radiale de l'ulna, du ligament annulaire et du ligament carré de Denucé. L'articulation radio-ulnaire distale se compose de la tête ulnaire, de l'incisure ulnaire du radius, des

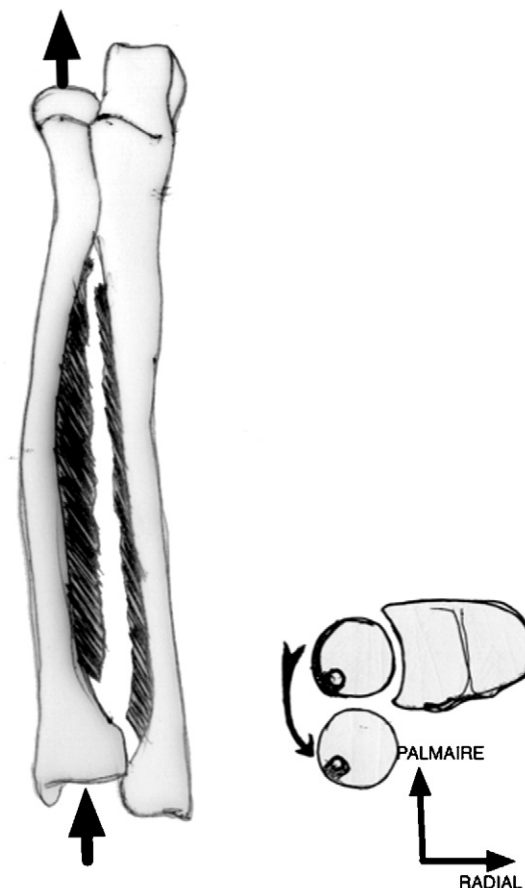


Fig. 8. Les instabilités possibles de l'avant-bras liées à une lésion de la MIO. L'instabilité antébrachiale peut se faire verticalement (tendance à l'ascension du radius) ou transversalement (vue inférieure d'une luxation dorsale de la tête ulnaire).

ligaments radio-ulnaires distaux palmaire et dorsal et du complexe ligamentaire du poignet connu sous le nom de TFCC. À partir des travaux biomécaniques et de la physiopathologie, nous proposons de définir une troisième articulation radio-ulnaire que nous qualifions de moyenne formée par la MIO et les diaphyses ulnaire et radiale.

3. Concept des trois « verrous » antébrachiaux

Contrairement aux autres segments de membre comme le bras ou la cuisse, l'avant-bras est plus qu'un simple segment de membre intercalé entre des articulations sus et sous-jacentes : l'avant-bras est un véritable complexe articulaire en soi. L'« unité radio-ulnaire » [45] doit être appréhendée comme l'association de trois « verrous » que sont les articulations radio-ulnaires proximale (verrou proximal), moyenne (verrou moyen) et distale (verrou distal). L'état de ce « ménage à trois » va conditionner la qualité de la biomécanique antébrachiale. Suivant la même logique, Hagert a assimilé l'avant-bras à une articulation bicondyloire, au même titre que le genou, dont l'axe de rotation passe et par la tête radiale et par la tête de l'ulna [46]. Toujours en comparant l'avant-bras et le genou, on peut faire l'analogie entre le pivot central (ligament croisé antérieur et postérieur) et la MIO.

STADE 1

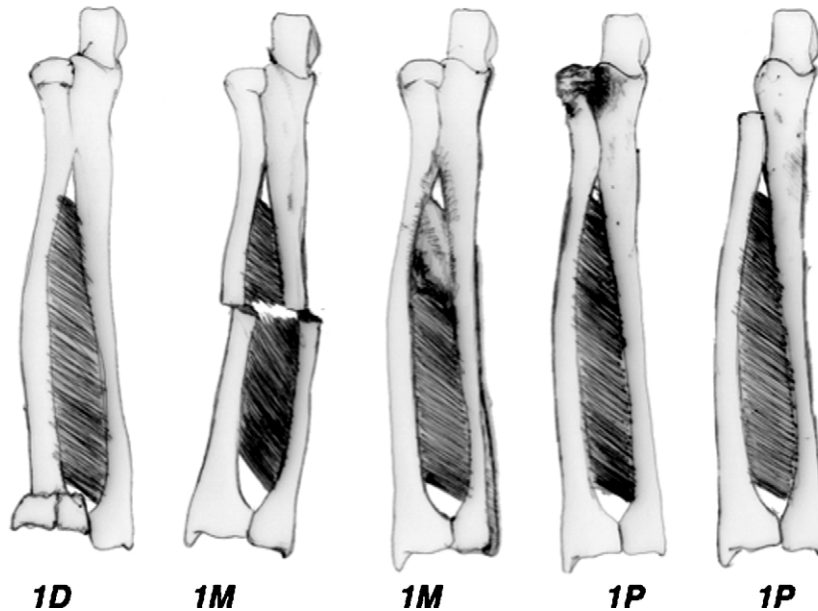


Fig. 9. Stade 1 : atteinte d'un seul verrou. 1D = atteinte isolée du verrou distal par fracture de l'extrémité distale du radius et « luxation » radio-ulnaire distale ; 1M = atteinte isolée du verrou moyen par fracture des deux os de l'avant-bras (instabilité, schéma de gauche) ou synostose radio-ulnaire (blocage) ; 1P = atteinte isolée du verrou proximal par synostose (blocage, schéma de gauche) ou instabilité par résection de la tête radiale.

Chacun des trois verrous doit être mobile et stable. Trois états peuvent caractériser un verrou pathologique : son blocage, son instabilité ou son absence. Afin d'illustrer ces propos, on peut donner les exemples suivants (Fig. 9) :

- une synostose radio-ulnaire proximale correspond à un blocage du verrou proximal ;
- une luxation de la tête ulnaire correspond à une instabilité du verrou distal ;
- une résection de la tête radiale correspond à une absence du verrou proximal ;
- une résection de la tête ulnaire correspond à une absence du verrou distal ;
- une déchirure de la MIO ou une fracture diaphysaire des deux os correspondent à une instabilité du verrou moyen.

En se basant sur ces constats et sur l'étude de la littérature, il est possible de faire plusieurs remarques importantes :

- le blocage d'un seul verrou va à lui seul bloquer l'ensemble de l'avant-bras ;
 - une synostose radio-ulnaire isolée des articulations radio-ulnaire proximale ou distale va bloquer toute la pronosupination,
 - dans les blocages de la pronosupination, situation bien connue des chirurgiens orthopédistes pédiatres, une des lésions anatomopathologiques associée est la rétraction de la MIO qui correspond au blocage du verrou moyen. La section de la MIO est un des gestes fondamentaux pour libérer la pronosupination [47–50],

- l'absence d'un seul verrou peut être compensée par la normalité des deux autres ;
 - la résection isolée de la tête ulnaire selon Darrach correspond à l'absence de verrou distal. Les suites de cette intervention sont bien connues et la pronosupination n'est pas perturbée quand les verrous proximal et moyen sont intacts [51]. Il existe parfois une instabilité du moignon distal qui correspond à une déstabilisation transversale, qui n'est pas associée à une déstabilisation longitudinale dans ce cas,
 - il en est de même pour la résection de la tête radiale qui correspond à la perte du verrou proximal et dont les résultats sont bons lorsque les verrous moyens et distaux restent intacts [52,53]. Une migration proximale de 1,9 mm a été rapportée à long terme après résection de la tête radiale, la MIO empêchant que celle-ci s'aggrave avec le temps [54],
 - une section isolée de la MIO n'aura pas de conséquence fonctionnelle tant que les articulations radio-ulnaires proximale et distale sont intactes comme nous avons pu le constater sur les pièces anatomiques,
- la déstabilisation de deux verrous ne peut pas être compensée par la stabilité isolée du dernier ;
 - une résection de la tête radiale (verrou proximal absent) pratiquée lorsque la MIO est rompue (verrou moyen instable) va s'accompagner d'une déstabilisation globale de l'avant-bras avec ascension progressive du radius et donner un mauvais résultat clinique [55]. Cette situation correspond au syndrome décrit initialement par Essex-Lopresti en 1951 [7],

- la section des ligaments radio-ulnaires, du TFCC (verrou distal) et de la MIO (verrou moyen) s'accompagnent d'une instabilité de la radio-ulnaire distale même si la radio-ulnaire proximale est intacte [56],
- la déstabilisation d'un verrou est exceptionnellement isolée et s'accompagne généralement d'une lésion associée ligamentaire ou osseuse (Fig. 10) ;
- les luxations dites « isolées » de la tête ulnaire sont très probablement plus une vue de l'esprit qu'une réalité. En effet, il semble très probable qu'une telle lésion s'accompagne forcément d'une lésion associée de la MIO (partielle ou totale). Plusieurs auteurs ont bien démontré que l'articulation radio-ulnaire distale était en grande partie stabilisée par la MIO. Une MIO et une articulation radio-ulnaire proximale intacte peuvent restabiliser une radio-ulnaire distale intrinsèquement instable [56–58]. Watanabe et al. ont démontré qu'une instabilité radio-ulnaire distale ne pouvait se produire que si la MIO est rompue [56]. La portion moyenne de la MIO stabilise dorsalement le radius, tandis que la portion distale stabilise la radio-ulnaire distale dans toutes les directions. Pour Gofton et al., si la radio-ulnaire proximale est intacte, une dislocation de la radio-ulnaire distale ne peut se produire qu'en cas de déchirure associée de la MIO [59]. Pour Kihara et al., une section des ligaments radio-ulnaire distaux et du TFCC ne suffit pas à disloquer la radio-ulnaire distale tant que la MIO est intacte [25]. Par

analogie, on peut penser que les instabilités radio-ulnaires distales observées dans la polyarthrite rhumatoïde s'accompagnent, à plus ou moins long terme, d'une distension progressive de la MIO (C. Fontaine, Communication personnelle),

- une fracture d'apparence isolée d'un des deux os est rarement isolée. La plus fréquente est la fracture isolée de l'ulna par mécanisme direct (posture de protection contre un agent vulnérant à l'aide de l'avant-bras). On définit les lésions de type Monteggia par l'association d'une fracture de l'ulna avec une disjonction radio-ulnaire proximale et les lésions de type Galeazzi par l'association d'une fracture du radius avec une disjonction radio-ulnaire distale (Fig. 10B),
- Leung et al. ont décrit récemment une nouvelle entité nosologique qu'ils ont baptisé *crisscross injury*. Ces lésions se définissent par l'association d'une atteinte des verrous proximaux (fracture ou luxation de la tête radiale) et distal (luxation de la tête ulnaire) avec une MIO intacte (verrou moyen) [60]. Dans ce type de lésion, la MIO est le pivot autour duquel les deux verrous extrêmes se disloquent.

4. Stabilité et instabilité de l'avant-bras

L'avant-bras doit être stable et mobile. Sa stabilité repose sur le composant osseux (radius et ulna), mais aussi sur le composant ligamentaire (ligament annulaire, MIO, TFCC...).

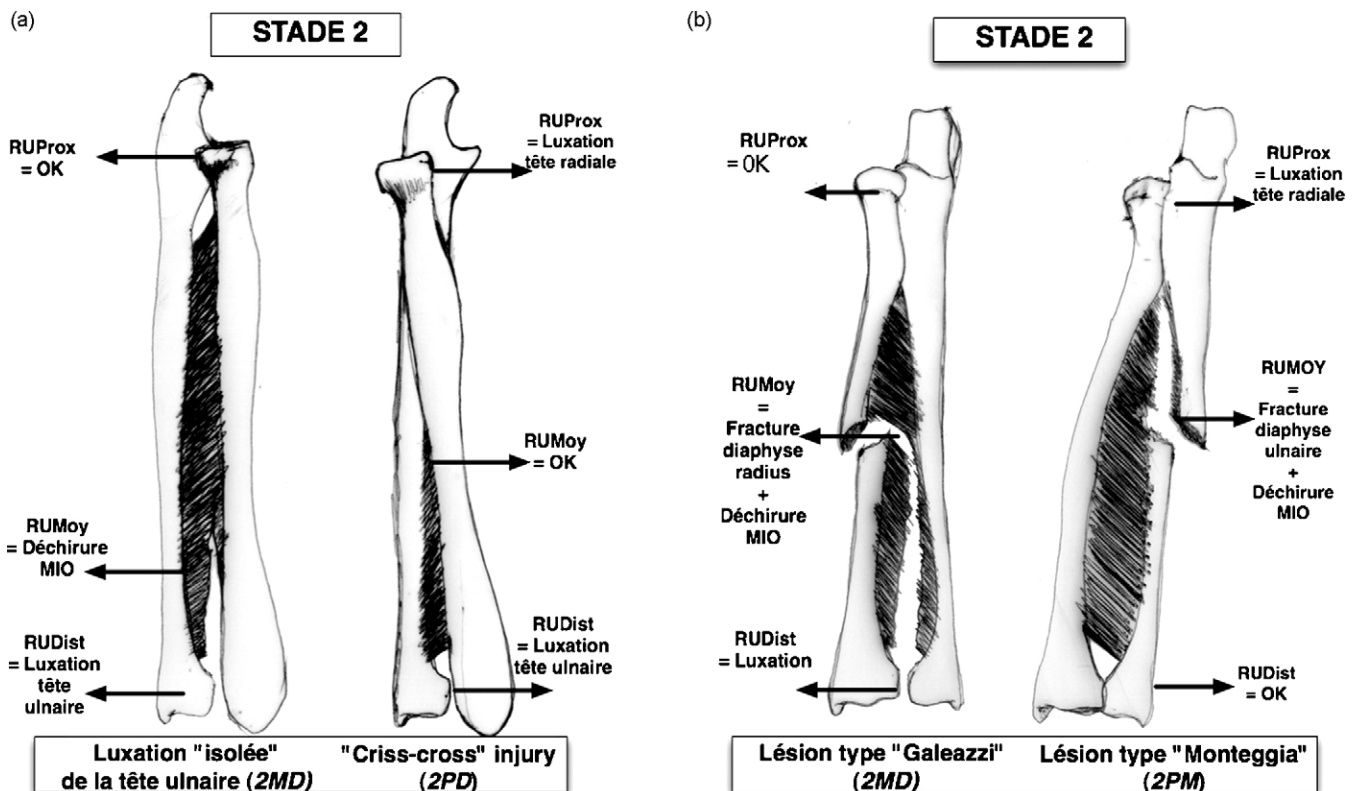


Fig. 10. Stade 2 : atteinte combinée de deux verrous. (10a) : une luxation « isolée » de la tête ulnaire paraît improbable sans lésion associée de la MIO (schéma de gauche). La luxation des deux articulations radio-ulnaires proximales et distales avec une membrane interosseuse intacte a été décrite récemment sous le nom de *crisscross injury* (schéma de droite). (10b) : les associations fracturaires d'un os de l'avant-bras à une luxation radio-ulnaire. Lésions dites de Monteggia et de Galeazzi.

Le composant ligamentaire assure le positionnement relatif des deux os entre eux [42,61]. La faillite du composant ligamentaire définit la dislocation radio-ulnaire. Chaque verrou se comporte comme un volant qui conduit le radius dans sa course autour de l'ulna. Comme nous l'avons vu plus haut, il faut au moins deux verrous intacts pour que la course du radius autour de l'ulna soit physiologique.

La stabilité doit être assurée dans deux directions : verticale (stabilité longitudinale) et transversale (stabilités antéro-postérieure et médio-latérale). L'avant-bras doit être stable quelle que soit la position de rotation de l'avant-bras.

La stabilité verticale (longitudinale) correspond au maintien des hauteurs relatives du radius et de l'ulna. Elle se manifeste notamment par la normalité de l'index radio-ulnaire distal :

- au niveau du verrou proximal, c'est la tête radiale essentiellement qui assure cette stabilité ;
- au niveau du verrou moyen, c'est la MOI ;
- au niveau distal, c'est surtout le TFCC, même si la forme de la radio-ulnaire distale peut avoir une certaine influence [62].

La stabilité transversale correspond au maintien des rapports antéro-postérieur et médio-latéral entre les deux os. Elle se manifeste par le maintien de la distance entre les deux os (absence de diastasis radio-ulnaire, absence de luxation radio-ulnaire proximale ou distale) :

- au niveau du verrou proximal, c'est surtout le ligament annulaire et accessoirement le ligament carré qui assurent cette stabilité ;
- au niveau moyen, ce sont essentiellement la MIO et les muscles à insertion mixte radiale et ulnaire (*pronator teres*, *flexor digitorum profundus*, *pronator quadratus*). Cette composante de stabilité transversale a notamment pour effet de diminuer les contraintes qui s'exercent sur la convexité des deux os [44]. Ces contraintes sont à l'origine des fractures des deux os par traumatisme indirect. Ainsi, en diminuant l'intensité de ces contraintes, la MIO aurait un rôle préventif sur les fractures des deux os en absorbant et en répartissant l'énergie vulnérante. C'est sur la base de l'intégrité de la MIO (et son rôle de stabilisation transversale) que repose le traitement traditionnel (orthopédique) des fractures de l'avant-bras en chine [63] ;
- au niveau distal, ce sont le TFCC et les ligaments radio-ulnaires distaux (palmaire et dorsal).

Cette stabilité transversale est liée également à la forme des articulations radio-ulnaires, distales et proximales, qui, par leur évasement, assurent l'éloignement des os de l'avant-bras. Cet éloignement physiologique permet, par exemple, le passage de la tubérosité radiale en face de l'ulna au cours de la supination. La résection distale de l'ulna, à l'inverse, autorise le rapprochement progressif des deux os avec l'apparition d'un conflit mécanique, qui se traduit habituellement par une simple encoche, conflit qui est parfois douloureux et gênant (Fig. 11).



Fig. 11. Rôle de l'architecture osseuse dans le maintien de l'écart entre les deux os de l'avant-bras. Chez cette patiente, la pseudarthrose intentionnelle au-dessus d'une arthrodèse radio-ulnaire distale a entraîné une instabilité transversale avec un conflit radio-ulnaire se traduisant par une encoche sur le radius.

5. L'avant-bras, le coude et le poignet

Ces concepts des trois verrous ne peuvent être considérés isolément, et il faut également inclure les autres éléments des articulations du coude et du poignet. Toute modification de la stabilité et des rapports intrinsèques de l'avant-bras va avoir des répercussions sur le coude et le poignet avec lesquels il s'articule :

- une ascension du radius (instabilité verticale) va entraîner des conflits ulno-carpien (ulna long relatif) et huméro-radial (entre l'extrémité proximale du radius et le capitulum) ;
- une luxation ou une fracture des têtes ulnaire (instabilité transversale) ou radiale entraînera des perturbations dans le fonctionnement du poignet ou du coude.

5.1. Mobilité de l'avant-bras et prono-supination

Le complexe articulaire antébrachial est directement dédié à un mouvement : la prono-supination [45,64]. Une prono-supination normale implique que les trois verrous antébrachiaux soient stables et libres. Le mouvement de prono-supination, au sens large, s'assimile à un phénomène de

rotation–dérotation des différentes articulations qui participent au mouvement.

L'ulna a une faible mobilité dans les mouvements de pronosupination, mais cette mobilité n'a réellement d'influence que dans les contraintes au niveau du coude et pour le dessin des prothèses totales de coude [65]. Si l'on se place à l'échelle de l'avant-bras, c'est le radius qui tourne autour de l'ulna. Ce dernier ne bouge pas, il est le référentiel du mouvement : on parle alors de pronosupination « à l'ulna fixe ». L'axe de cette pronosupination « à l'ulna fixe » est représenté schématiquement par la ligne qui joint le centre de la tête radiale et la styloïde ulnaire [24,66,67].

Lorsque l'on se place à l'échelle du membre supérieur dans son ensemble, la pronosupination « globale » fait intervenir ensemble l'épaule, le coude, l'avant-bras et le poignet. La collaboration de tous ces groupes articulaires induit un mouvement plus complexe dont l'axe de rotation est variable. Cet axe s'aligne classiquement sur celui de l'outil que tient la main (tournevis, clé...).

6. Les muscles

Tout ce système ostéoligamentaire n'a de sens que si un système musculaire lui est associé. D'un point de vue fonctionnel, il faut distinguer les muscles moteurs de la pronosupination, en outre, des muscles ayant tendance à déstabiliser l'avant-bras. Les muscles pronateurs sont essentiellement les *pronator teres* et *pronator quadratus*. Les muscles supinateurs sont représentés principalement par le *supinator* et le *biceps brachii*. Le *brachioradialis* est essentiellement un fléchisseur du coude, il est pronateur de l'avant-bras quand celui-ci est en supination, supinateur quand l'avant-bras est en pronation. Le muscle *biceps brachii* ainsi que l'ensemble des muscles à insertion huméro-carpienne (fléchisseurs et extenseurs du poignet et certains muscles extrinsèques des doigts) favorisent la migration proximale du radius et donc la déstabilisation longitudinale de l'avant-bras. Les muscles du plan profond de la loge postérieure, tous obliques en bas et en dehors, favorisent également l'ascension du radius par rapport à l'ulna lors de leur contraction.

7. Pathologie

Nous ne détaillerons ici que les lésions traumatiques (déchirure) de la MIO. Les synostoses radio-ulnaires, les rétractions ne seront pas traitées de même que les syndromes de loges, aigus ou chroniques. Les atteintes de la MIO vont entraîner soit une instabilité verticale, ce qui se traduit généralement par une ascension du radius par rapport à l'ulna sous l'effet de muscles tels que le *biceps brachii*, les fléchisseurs et les extenseurs du poignet [68]. L'instabilité transversale se traduit généralement par une luxation des têtes ulnaire et/ou radiale.

Les ruptures de la MIO peuvent n'être que partielles, lorsqu'elles n'intéressent qu'un seul secteur de la MIO ou totales. On distinguera les atteintes d'un verrou isolé, de deux verrous ou, à l'extrême, des trois verrous. En pratique clinique,

devant toute atteinte traumatique de l'avant-bras, il faut essayer de comprendre le mécanisme lésionnel et rechercher la lésion ostéoligamentaire associée. Comme nous l'avons vu plus haut, une lésion ostéoligamentaire de l'avant-bras est rarement isolée : à une lésion d'une partie du cadre antébrachial s'associe très souvent une autre lésion. Les déchirures de la MIO seront le plus souvent secondaires à un traumatisme longitudinal, tel qu'une chute avec réception sur la main avec poignet étendu, comme l'ont montré des études cadavériques [69]. Avec un tel mécanisme, outre l'intensité de la force vulnérante, c'est surtout le degré de rotation de l'avant-bras qui va conditionner la nature des lésions [70]. Aux alentours de la supination maximale, la même énergie provoquera plutôt des fractures des deux os, tandis qu'à environ 45° de supination, c'est plutôt une fracture de la tête radiale qui surviendra, la limite (significative) survenant autour de 10° de rotation à partir de la supination maximale. Un syndrome d'Essex-Lopresti se produira à proximité de la rotation neutre, la limite entre fracture de la tête radiale et lésion d'Essex-Lopresti se situe autour de 54° de pronation à partir de la supination maximale [70]. Les fractures simples de la tête radiale se produisent autour de 45° de supination, les fractures complexes étant observées autour de 75° de pronation (à partir de la supination), la conséquence pratique est que toutes les fractures complexes de la tête radiale doivent faire suspecter une lésion associée de la MIO. Devant des lésions doubles de l'avant-bras (fracture et luxation radio-ulnaire proximale ou distale, fracture des deux os, luxation radio-ulnaire proximale et distale) il faudra toujours suspecter une lésion de la MIO qui s'étendrait d'un foyer lésionnel à l'autre [71]. On peut faire l'analogie avec les fractures de Maisonneuve à la jambe où la membrane interosseuse de la jambe est déchirée depuis la fracture de la malléole tibiale jusqu'à la fracture du col fibulaire. Comme les lésions de la MIO sont souvent méconnues en pratique quotidienne, on connaît encore mal les associations lésionnelles entre les différentes lésions ostéoligamentaires et les lésions de la MIO. Il semble que la MIO se rompe plus volontiers sur son versant ulnaire [69].

7.1. Classification lésionnelle

Le concept des trois verrous permet de proposer une classification lésionnelle de l'ensemble des traumatismes ostéoligamentaires de l'avant-bras en trois stades :

- Stade 1 : atteinte isolée d'un verrou (Fig. 9) :
 - 1P = atteinte isolée du verrou proximal (fracture de la tête radiale, résection de la tête radiale),
 - 1M = atteinte isolée du verrou moyen (fracture isolée de l'ulna, fracture diaphysaire des deux os),
 - 1D = atteinte isolée du verrou distal (fracture de l'extrémité distale du radius, fracture distale des deux os, fracture de la tête ou du col de l'ulna, lésions du TFCC...),
- Stade 2 : atteinte de deux verrous (Fig. 10) :
 - 2PM = atteinte des verrous proximal et moyen (lésion du type Monteggia),

- 2MD = atteinte des verrous moyen et distal (lésion du type Galeazzi),
- 2PD = atteinte des verrous proximal et distal (*Crisscross injury*),
- **Stade 3** : atteinte de trois verrous (syndrome d'Essex-Lopresti).

8. Stade 1M = atteinte isolée du verrou moyen

L'atteinte de la MIO et/ou de la diaphyse d'un des deux os, signe l'atteinte du verrou moyen (radio-ulnaire moyenne). Il s'agit surtout des fractures diaphysaires des deux os de l'avant-bras. Dans ce contexte, il est très probable que la MIO soit déchirée entre les deux fractures. La logique anatomique voudrait que, si le trait ulnaire est situé plus bas que le trait radial, la MIO est déchirée dans le sens (de ses fibres) longitudinal, alors que si le trait ulnaire est situé plus haut que le trait radial la membrane interosseuse sera déchirée perpendiculairement à ses fibres. Dans ce dernier cas, le risque de synostose pourrait être plus élevé. Les fractures isolées d'un seul os, en général l'ulna, sont plus rares et sont la conséquence de traumatismes directs et dans ces cas, les lésions de la MIO sont minimales.

9. Stades 1P et 1D = atteinte isolée du verrou proximal ou distal

Les fractures « isolées » de la tête radiale s'accompagnent dans un nombre important de cas de lésions associées, notamment ligamentaires [72,73]. Bien que les deux poignets ne soient pas symétriques [74], la différence mesurée entre les deux côtés n'était que de 1,2 mm. Une fracture de la tête radiale avec une inversion de l'index radio-ulnaire distal de plus de 2 mm doit donc faire suspecter une lésion associée de la MIO [10]. L'extension de ces lésions à la MIO, comme dans les cas de luxations dites « isolées » de la tête ulnaire, est très peu connue et probablement sous-estimée (cf. plus haut concept des trois « verrous » antébrachiaux).

10. Stades 2PM et 2MD = atteinte de deux verrous dont le verrou moyen

Ces atteintes associent à une lésion du verrou moyen une lésion du verrou proximal ou distal. Dans ce groupe, on peut inclure les lésions de type Monteggia et les lésions de type Galeazzi. Les lésions du type Monteggia associent une fracture diaphysaire d'un os de l'avant-bras (ulna) à une atteinte de l'articulation radio-ulnaire proximale : luxation essentiellement, parfois fracture de la tête radiale. Le mécanisme de torsion et le siège très distal de l'atteinte ulnaire de ces fractures explique également la fréquence, au moins théorique des lésions de la MIO [75]. Les lésions de type Galeazzi associent une fracture diaphysaire (radius) avec une atteinte de l'articulation radio-ulnaire distale (entorse, luxation). Il semble que les fractures du radius quand elles siègent assez bas (<7,5 cm), s'accompagnent plus souvent d'une instabilité radio-ulnaire (Rettig cité in [10]).

11. Stade 2PD = atteinte de deux verrous avec intégrité du verrou moyen (*Crisscross injury*)

Ce groupe associe des lésions des verrous proximal et distal, tandis que le verrou moyen est intact. Ces lésions ont été récemment décrites par Leung et al., qui ont surnommé cette entité *crisscross injury* [60]. Lorsque se produisent simultanément une luxation dorsale de la tête ulnaire et une fracture tête radiale, la MIO ainsi que les diaphyses des deux os intactes, sont le pivot autour duquel les verrous proximal et distal se disloquent.

12. Stade 3 = atteinte des trois verrous (syndrome d'Essex-Lopresti)

Ce tableau clinique a été initialement décrit par Curr et Coe, mais porte le nom d'Essex-Lopresti qui en a publié deux cas en 1951 [6,7]. Même s'il est rare, il semble que tout chirurgien orthopédiste sera amené à prendre en charge au moins un cas durant sa carrière et des cas supplémentaires sont régulièrement rapportés dans la littérature [76]. Il s'agit d'une dislocation

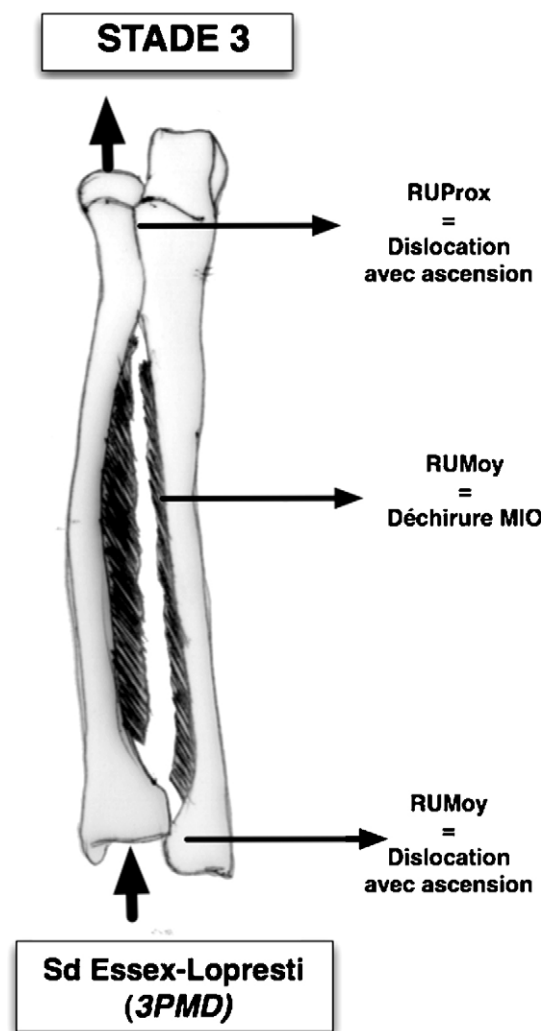


Fig. 12. La lésion des trois verrous. Le stade 3 ou lésion des trois verrous correspond au syndrome classique décrit par Essex-Lopresti.

radio-ulnaire globale (Fig. 12). Dans ce syndrome, c'est l'instabilité verticale qui est au premier plan, mais la stabilité transversale est forcément compromise aussi. Le syndrome d'Essex-Lopresti associe un tableau lésionnel et un tableau clinique.

Le tableau lésionnel comprend une atteinte :

- de la radio-ulnaire proximale (verrou proximal) à type de fracture de la tête radiale généralement. Parfois, dans les formes vieilles ayant eu une résection chirurgicale de la tête radiale, la radiographie montrera une ascension du radius [77]. Le moignon radial pourra à l'extrême entrer en conflit avec le capitulum ;
- de la radio-ulnaire moyenne (verrou moyen) à type de déchirure de la MIO. Cette déchirure est invisible à la radiographie standard statique et il faudra recourir à d'autres artifices (cf. Exploration de la MIO) ;
- de la radio-ulnaire distale (verrou distal) à type de rupture du TFCC. L'inversion de l'index radio-ulnaire distal radiologique signe l'ascension du radius. Il peut s'y associer une luxation dorsale ou palmaire de la tête ulnaire.

Le tableau clinique, dans sa forme complète, est caractérisé par l'atteinte bipolaire du coude et du poignet. Chaque verrou peut être le siège de douleurs et de limitations de mobilité. Les limitations de mobilité concernent la prono-supination, ainsi que les mobilités du coude et du poignet. L'atteinte du coude peut être secondaire à une fracture de la tête radiale, à un conflit huméro-radial, à une luxation de la tête radiale ou à une synostose. L'atteinte du poignet peut être secondaire à un conflit ulno-carpien par inversion de l'index radio-ulnaire distal, à une luxation de la tête ulnaire ou à une synostose [77].

Il faut bien distinguer les formes aiguës des formes vieilles. Les formes aiguës sont exceptionnellement complètes, ce qui explique que le diagnostic passe souvent inaperçu (Fig. 13). Dans les formes chroniques, la dislocation radio-ulnaire globale s'installe insidieusement, d'autant plus qu'on aura réalisé une résection isolée de la tête radiale (résection du verrou proximal). Enfin, les formes vieilles sont beaucoup plus difficiles à traiter que les formes aiguës, ce qui fait tout l'intérêt du diagnostic précoce [78].

12.1. Cicatrisation de la MIO ou aggravation progressive des lésions

Une déchirure de la MIO peut-elle spontanément cicatrifier ? Si oui, cette cicatrice est-elle fonctionnellement satisfaisante ? Ces questions font l'objet d'un débat qui n'est pas encore tranché. Avec les données actuelles de la littérature, on ne peut raisonner que sur un faisceau d'arguments. On recense dans la littérature et en pratique des cas typiques de syndromes d'Essex-Lopresti diagnostiqués à distance de l'accident initial. L'aggravation clinique et l'ascension progressive du radius permettent d'affirmer que certaines lésions ne cicatrisent pas spontanément [12,13,55]. Cependant, les lésions de la MIO ne sont qu'exceptionnellement diagnostiquées en urgence et il est donc impossible d'estimer le pourcentage de lésions qui

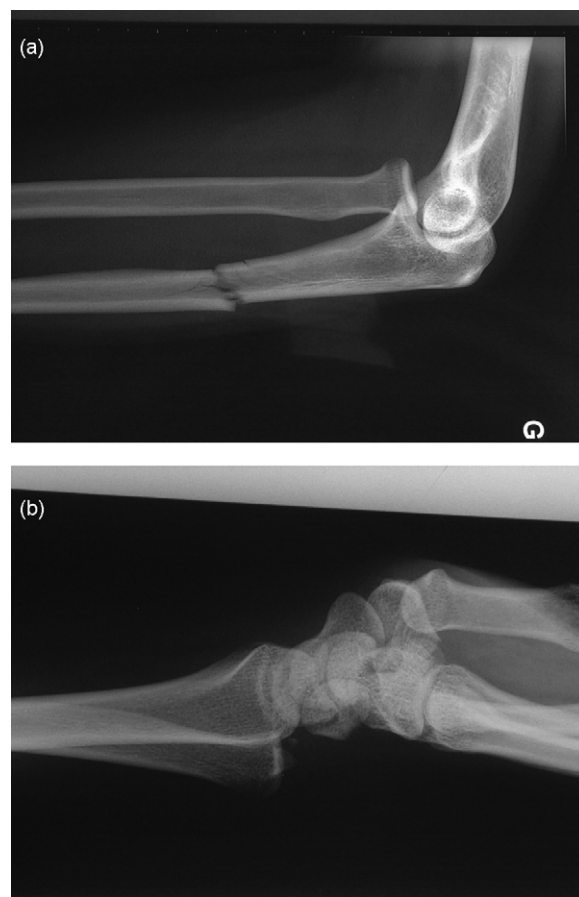


Fig. 13. Syndrome d'Essex-Lopresti. À l'occasion d'une chute sur l'avant-bras, cette jeune fille présente une fracture (peu déplacée) de l'ulna, une luxation de la tête radiale (Fig. 13a), et une lésion de la radio-ulnaire distale avec luxation et fracture de l'apex du processus styloïde ulnaire (Fig. 13 b et c).

s'aggravent ou qui évoluent favorablement. Des constatations opératoires de déchirures avérées de la MIO vues en urgence ont été rapportées par Failla [71]. Il décrit un éloignement des berges de la rupture lié à leur rétraction et à la saillie de muscles à travers la rupture. Ces constatations suggèrent des analogies avec deux lésions ligamentaires dont on connaît bien l'histoire naturelle défavorable : la rupture du ligament croisé antérieur (LCA) du genou et l'entorse grave du ligament collatéral médial du pouce. L'entorse grave du LCA, qui consiste le plus souvent en une désinsertion au plafond, entraîne un éloignement des berges de la rupture par contraintes intrinsèques (rétraction ligamentaire des berges) et extrinsèques (gravité, mobilisation articulaire qui éloigne cycliquement les points d'insertion). L'analogie avec la lésion de Stener du ligament collatéral médial du pouce repose sur l'interposition musculaire qui empêche la cicatrisation spontanée.

Une ascension progressive du radius de plusieurs millimètres (>5 mm) est parfois observée après résection chirurgicale de la tête radiale. Une telle ascension ne peut se produire que si la MIO est incompetente. Il n'y a que deux possibilités physiopathologiques :

- soit la MIO est totalement déchirée d'emblée lors du traumatisme et ne cicatrise pas ;



Fig. 14. Absence de cicatrisation de la MIO. Aggravation progressive d'une instabilité longitudinale de l'avant-bras par lésion méconnue de la MIO. La fracture de la tête radiale a été traitée par résection malgré une instabilité du coude pourtant visible sur le cliché initial (Fig. 14a). Rapidement le patient développe une arthrose du coude (Fig. 14b) liée à son instabilité et une dislocation de la radio-ulnaire distale (Fig. 14c) liée à une lésion méconnue de la MIO.

- soit la MIO est partiellement déchirée lors du traumatisme. La seule façon d'atteindre le stade de rupture complète passe par une aggravation progressive des lésions par distension et/ou rupture progressive des fibres restantes. Cette usure progressive serait la conséquence des contractions répétées de muscles tels que le *biceps brachii* (Fig. 14).

Dans l'hypothèse d'une aggravation progressive des lésions, une des questions essentielles est de définir le seuil lésionnel critique au-delà duquel la MIO restante va progressivement se dégrader. La définition d'un tel seuil permettrait de préciser les indications de gestes visant à restabiliser l'avant-bras (ligamentoplastie de la MIO, prothèse de tête radiale...). Nous réexaminons actuellement en échographie des patients ayant des traumatismes anciens de l'avant-bras avec forte suspicion de déchirure de la MIO. Jusqu'à maintenant, tous les patients présentaient des anomalies persistantes avec une asymétrie indiscutable entre les cotés sain et pathologique. On retrouve des portions de MIO cicatricielles, mais non fonctionnelles avec un signe de la hernie musculaire positif (cf. Méthodes d'exploration).

En 2006, l'histoire naturelle des déchirures de la MIO est donc inconnue. Sa compréhension va nécessiter des études ultérieures ainsi qu'une amélioration des moyens diagnostiques pour dépister précocement ces lésions et en suivre l'évolution. Une meilleure connaissance de cette histoire naturelle est indispensable pour définir les indications thérapeutiques à la phase précoce. En effet, les lésions en phase chronique sont très difficiles à traiter. Elles sont source d'échec et peuvent mener à l'escalade thérapeutique [77,79,80].

13. Méthodes d'exploration

Le retard diagnostique, et donc de traitement des instabilités de l'avant-bras, est un des principaux facteurs péjoratifs du pronostic de ces lésions [79,80]. C'est tout l'intérêt que représente le dépistage précoce de ces lésions.

13.1. Radiographies statiques

La MIO est radiotransparente et son atteinte ne pourra être qu'indirectement suspectée devant des signes osseux ou des

pertes des rapports articulaires. L'atteinte de la MIO sera affirmée devant une ascension globale du radius par rapport à l'ulna avec une dislocation des articulations radio-ulnaires proximale et distale. Dans le cadre d'un traumatisme de l'avant-bras, il faudra donc systématiquement réaliser des radiographies du coude et du poignet de face et de profil stricts. Ce cas est cependant rare en urgence et il est plus souvent retrouvé en phase chronique (ascension progressive du radius). À côté de ce tableau radiologique typique, on peut retrouver toutes les lésions précédemment décrites. On étudiera donc successivement le verrou proximal (luxation radio-ulnaire proximale, fracture de la tête radiale), le verrou moyen (fracture diaphysaire d'un ou des deux os...), et le verrou distal (luxation radio-ulnaire distale...). Encore une fois, devant une lésion d'apparence isolée, il faudra s'obstiner à en rechercher une seconde associée. S'il y a une lésion de la MIO, celle-ci sera étendue entre les deux étages ostéoligamentaires atteints (déchirure étendue de la fracture de l'ulna jusqu'à l'articulation radio-ulnaire proximale dans le cas d'une fracture de type Monteggia, par exemple).

13.2. Radiographies dynamiques

Devant les limites de l'examen radiologique statique, il paraît logique de potentialiser cet examen à l'aide de manœuvres dynamiques. Idéalement, cet examen dynamique est réalisé sous anesthésie au bloc opératoire. On pourra ainsi dépister une instabilité radio-ulnaire distale ou proximale lors de clichés en stress (prono-supination, mobilisation fracturaire). Smith a proposé un test radiographique original appelé *radius pull test* [81]. Dans ce test, le stress appliqué sur l'avant-bras est longitudinal et il permet de dépister une instabilité radio-ulnaire longitudinale. On compare l'index radio-ulnaire distal avec et sans stress. Pour les auteurs, une ascension du radius supérieure à 3 mm affirme une déchirure complète de la MIO. Un déplacement supérieur à 6 mm signe la rupture associée de la MIO et du TFCC.

13.3. Imagerie par résonance magnétique

L'IRM a été proposée par plusieurs auteurs et elle est actuellement considérée comme le *gold standard* [16,69,82,83]. Ses principales qualités sont sa résolution spatiale et l'absence de caractère opérateur-dépendant (gage de reproductibilité). Cependant, ses défauts dans ce contexte ne sont pas négligeables : c'est un examen d'accès difficile en urgence, voire même en semi-urgence, onéreux, n'autorisant pas de manœuvres dynamiques et qui est potentiellement artéfacté par le matériel métallique qui est souvent utilisé dans ces traumatismes (plaque d'ostéosynthèse sur le radius ou l'ulna). La MIO peut être directement visualisée et apparaît en hyposignal T1 et T2. Les meilleures séquences pour la visualiser sont les séquences en suppression de graisse (Fig. 15). Les coupes transversales sont les coupes de référence. La MIO est tendue entre le radius et l'ulna. Une rupture de la MIO pourra être vue directement comme une interruption en plein corps de l'image de la MIO. Pour McGinley, sur une étude

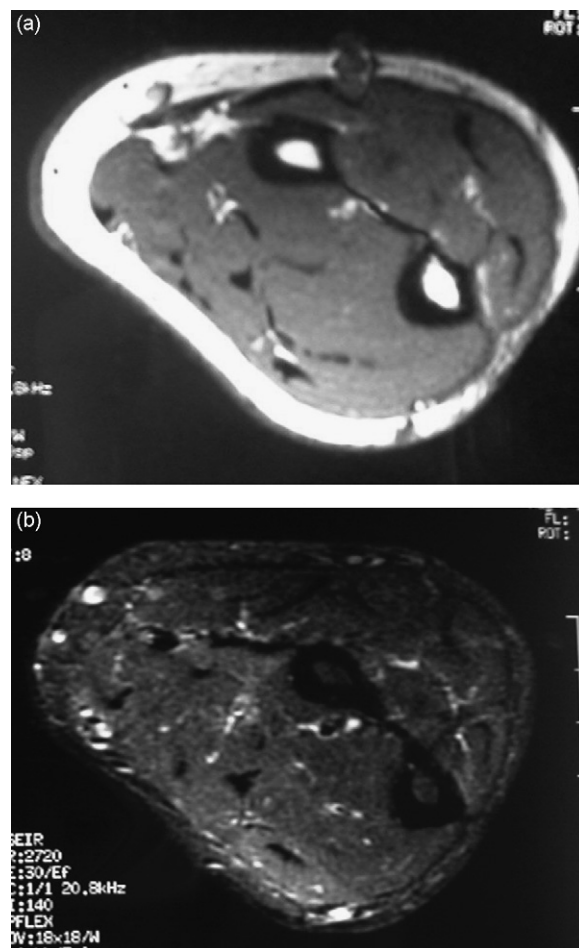


Fig. 15. La membrane interosseuse en IRM. La membrane interosseuse est bien visible en hyposignal en T1 comme en T2 ; cependant, reproduire ces coupes sur des lésions fraîches ou chez des patients qui ont eu une intervention rend l'interprétation plus délicate, surtout si du matériel métallique a été utilisé.

cadavérique regroupant 60 spécimens, la valeur prédictive positive est de 100 %, la valeur prédictive négative de 89 %, la sensibilité de 87,5 % et la spécificité de 100 % [69]. Ces chiffres sont ceux d'un auteur travaillant sur le sujet depuis de nombreuses années, et ils sont très supérieurs à ceux qu'on peut attendre en pratique clinique.

13.4. Échographie statique

L'échographie vient naturellement se positionner entre l'IRM et la radiographie standard. Son principal inconvénient réside dans son caractère opérateur dépendant. La pertinence de l'examen repose sur l'expérience de l'examineur. En revanche, ses avantages sont nombreux : possibilité de visualiser directement la MIO, accès généralement aisé à un appareil d'échographie en urgence, coût peu élevé de cet examen, possibilité de réaliser une exploration avec des manœuvres dynamiques, absence d'interférence avec le matériel métallique et facilité pour réaliser un examen bilatéral et comparatif. On distinguera l'examen statique de l'examen avec manœuvres dynamiques. L'examen statique a été évalué

par plusieurs auteurs comme ayant une sensibilité et spécificité très bonnes (presque 100 % !) [71,84,85].

13.5. Échographie dynamique et signe de la hernie musculaire

L'échographie statique paraît moins performante que l'IRM et nous avons été surpris qu'aucun auteur ne cherche à exploiter les possibilités dynamiques de l'échographie pour potentialiser cet examen. En se basant sur les constatations opératoires de Failla [71] qui a décrit une tendance à la saillie musculaire à

travers les berges de la rupture, ainsi que sur nos séances de dissections nous avons décrit le signe échographique de la hernie musculaire [86]. Sur une étude cadavérique, nous avons montré que ce signe recherché de façon bilatérale et comparative permettait de potentialiser la pertinence de l'examen échographique. Le principe de cet examen dynamique est de tester mécaniquement la MIO à ces différents étages. Normalement, une compression antéro-postérieure sur les muscles de l'avant-bras provoque un léger bombement dorsal de la MIO lorsque celle-ci est intacte. Quand la MIO est déchirée, la même manœuvre provoque une saillie des muscles

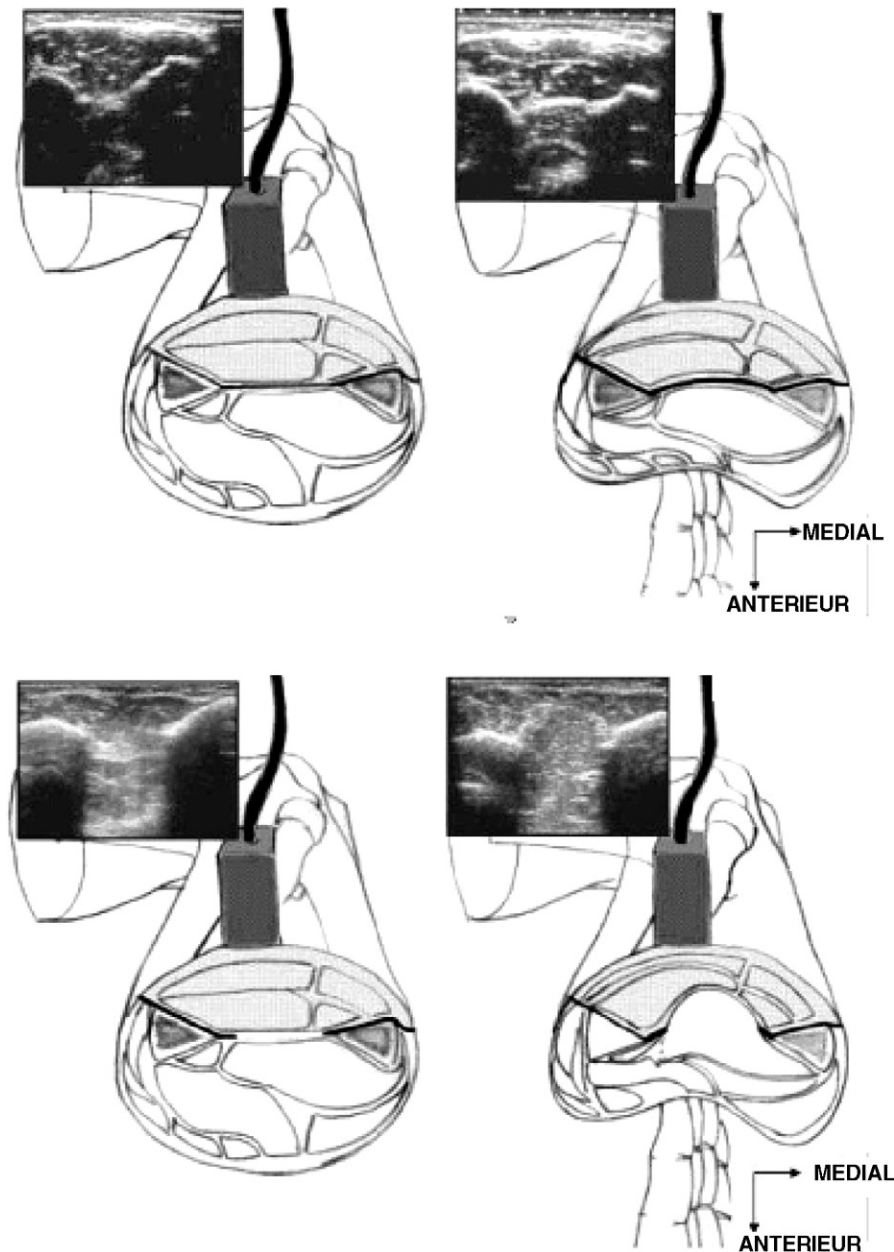


Fig. 16. Le signe de la hernie musculaire. Une déchirure isolée de la MIO rend possible la saillie des muscles fléchisseurs à travers la rupture lors d'une manœuvre de compression antéro-postérieure. Ce phénomène se voit très bien avec un échographe. En vue statique, la membrane interosseuse apparaît comme une bande tendue entre les deux os de l'avant-bras (dessin en haut et à gauche). La pression antéro-postérieure sur l'avant-bras n'entraîne pas de modification (schéma de droite). Lors d'une rupture, la membrane peut n'être plus visible, mais cette situation n'est pas constante (schéma en bas, à gauche). La pression sur les muscles de la loge antérieure de l'avant-bras fait saillir les muscles dans la loge postérieure, traduisant la rupture : c'est le signe de la hernie musculaire.

fléchisseurs à travers la rupture (Fig. 16). Ce signe est recherché sur une coupe axiale, avec un avant-bras en rotation neutre. Paradoxalement, il n'est pas indispensable de visualiser directement la MIO, car ce qui est évalué dans ce signe est la mobilité de l'ensemble des muscles fléchisseurs pendant la compression antéro-postérieure et non pas la MIO elle-même. On peut donc rechercher ce signe avec des appareils d'échographie à résolution réduite. Dans notre étude cadavérique, la sensibilité et la spécificité ont été évaluées à 100 % en zones proximale et moyenne. C'est en région distale que l'état de la MIO était le plus difficile à préciser, peut-être à cause de la présence du *pronator quadratus* qui est fixé dans sa loge propre. Les autres études ne s'étaient pas intéressées à l'exploration étagée de la MIO, mais à une exploration globale.

Nous proposons maintenant d'exprimer le statut lésionnel de la MIO en divisant cette dernière en trois portions : tiers proximal, tiers moyen et tiers distal. Cette division permet de cartographier la MIO du patient. La systématisation de l'examen échographique est indispensable pour permettre sa reproductibilité dans le temps et pour comparer différents examens ainsi que les résultats de plusieurs équipes. Ce protocole d'analyse pourra servir de base au démembrement de la pathologie de la MIO lors des études à venir.

14. Thérapeutique

Là encore, nous ne traiterons dans cette conférence que les lésions d'instabilité créées par une lésion de la MIO. Compte tenu du caractère encore très incomplet de nos connaissances sur les lésions de la MIO, la littérature et notre expérience ne portent que sur la « réparation » de la bande centrale. Il est probable qu'existent également, des lésions des seules parties proximales ou distales de la MIO, associées aux lésions osseuses, mais leur existence et leurs conséquences sont, pour l'instant, quasiment inconnues. Selon la nature des lésions, on distinguera les gestes thérapeutiques osseux purs de ceux portant sur les articulations et le composant ligamentaire. Nous rappelons que les résultats seront d'autant plus mauvais que les lésions seront anciennes. C'est pour ces formes vieilles et dont les traitements sont des échecs qu'ont été proposés des solutions de sauvetage comme la cubitalisation du radius ou *single bone forearm* des anglosaxons [9,87].

14.1. Gestes osseux

Une fracture de l'ulna ou du radius nécessitera une réduction parfaite avant ostéosynthèse. De la perfection de cette réduction découlera la résolution des lésions articulaires associées. Dans le cadre d'une fracture de type Monteggia, par exemple, il est impossible d'obtenir une articulation radio-ulnaire proximale réduite et stable tant que la réduction diaphysaire n'est pas parfaite. Contrairement à la plupart des autres fractures diaphysaires (humérus, fémur, tibia, métacarpien...) qui tolèrent de petits défauts de réduction et qui sont les indications de choix des ostéosynthèses centromédullaires, seule une réduction à ciel ouvert parfaite (axe, longueur, rotation) associée à une ostéosynthèse par plaque est envisageable dans

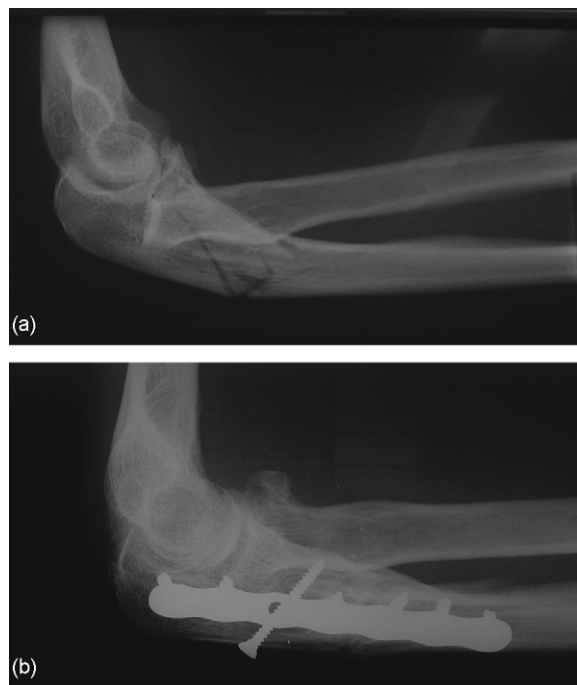


Fig. 17. L'intrication des verrous. La fracture de Monteggia est un bon exemple de l'intrication des différents verrous. La fracture de l'ulna déplacée s'accompagne toujours d'une lésion de la radio-ulnaire proximale (Fig. 17a). La simple réduction avec fixation stable de l'ulna (verrou moyen), suffit à corriger l'instabilité de la tête radiale (verrou supérieur) (Fig. 17b).

ce contexte (Fig. 17). Comme nous l'avons déjà dit plus haut, l'avant-bras ne doit pas être simplement considéré comme un segment de membre, mais comme un véritable complexe articulaire. Ces fractures des deux os doivent donc être appréhendées comme des fractures articulaires, avec les mêmes impératifs de qualité. Plusieurs études ont démontré la sévérité des conséquences fonctionnelles de troubles rotationnels [22–24] ou d'angulations vicieuses [88] sur l'amplitude de la pronosupination et la stabilité des articulations radio-ulnaires proximale ou distale adjacentes. Dans ces lésions, une atteinte associée d'une partie de la MIO est possible, mais elle semble n'avoir aucune conséquence fonctionnelle si le geste osseux est correctement réalisé.

14.2. Gestes sur la radio-ulnaire proximale

Une luxation de la radio-ulnaire proximale dans le cadre d'une fracture de type Monteggia se réduira automatiquement lorsque la fracture de l'ulna sera réduite. Il ne sera généralement pas nécessaire d'aborder cette articulation sauf dans les rares cas d'incarcération de parties molles (ligament annulaire). Une fracture de la tête radiale sera traitée selon les règles habituelles, mais en recherchant systématiquement une déchirure de la MIO [72,89,90]. Dans certains cas (fracture Mason III), la résection de la tête radiale permet de lever le conflit articulaire et de libérer la radio-ulnaire proximale. Le risque est alors de décompenser une instabilité longitudinale de l'avant-bras liée à déchirure de la MIO. Dans ce cas, l'exérèse isolée de tête radiale est contre-indiquée du fait du risque de

migration proximale secondaire du radius [12] et le traitement doit faire appel à une prothèse de tête radiale « rigide » dont les modèles sont nombreux maintenant depuis les premières publications de Judet [91,92]. Nous n'avons jamais réalisé ni retrouvé dans la littérature d'allusion à l'association d'une résection de la tête radiale et d'une ligamentoplastie de la MIO. Si le plan ligamentaire interne du coude est compétent, une ligamentoplastie de la MIO devrait permettre de stabiliser longitudinalement l'avant-bras et de prévenir l'ascension du radius. Les prothèses de tête radiale sont indiquées en cas de fracture comminutive. En cas de rupture associée de la MIO, la charge longitudinale que subit une prothèse de tête radiale est augmentée [93]. Une ligamentoplastie de la MIO peut diminuer les contraintes longitudinales et ainsi prévenir la surcharge du compartiment externe [34,94,95]. Une surcharge du compartiment externe peut entraîner une arthrose du capitulum, des douleurs, voire des phénomènes de subluxation ou de luxation prothétique [96]. Nous avons déjà réalisé une ligamentoplastie de la MIO en association avec une prothèse de tête radiale chez un patient avec un bon résultat fonctionnel [97]. On manque encore de recul sur ces ligamentoplasties de la MIO, mais l'on est en droit d'espérer qu'elles pourraient à elle seule stabiliser un avant-bras avec MIO rompue même après résection isolée de la tête radiale. L'arthroplastie des deux compartiments (tête radiale et capitulum) a été proposée, mais aucune série n'est disponible.

Dans les formes chroniques, quand la migration proximale du radius est importante et non réductible, l'association prothèse de tête radiale (plutôt qu'allogreffe de tête radiale) et raccourcissement de l'ulna a été proposé [10].

14.3. Gestes sur la radio-ulnaire distale

Les objectifs du traitement consistent là encore à stabiliser ce verrou, à maintenir ou restaurer l'index radio-ulnaire et à conserver ou rétablir la mobilité articulaire. Dans les instabilités radio-ulnaires distales, on immobilise l'avant-bras en position de réduction qui est généralement plus proche de la supination. En complément à ce traitement orthopédique, il est possible de mettre en place une broche temporaire radio-ulnaire. Ces traitements reposent sur le postulat que les ligaments stabilisateurs de la radio-ulnaire distale (TFCC) vont cicatriser en position de fonction. Il est également possible chirurgicalement de reconstruire le TFCC et différentes techniques sont décrites [98,99], parfois remplacées par un raccourcissement de l'ulna pour retendre le TFCC [100].

La restauration de l'index radio-ulnaire pourra être réalisée par manœuvres externes si les lésions sont fraîches, mais dans la majorité des cas, la prise en charge ne survient qu'à la phase chronique. À ce stade, l'allongement relatif de l'ulna sera irréductible, et il faudra forcément recourir à un geste osseux de raccourcissement. Le plus souvent, on procédera à une ostéotomie de soustraction diaphysaire ostéosynthésée par plaque mais récemment, de nouvelles techniques d'ostéotomies de la tête ulnaire ont été proposées permettant des corrections dans différents plans et avec des amplitudes de plusieurs millimètres [101]. À un stade extrême, on pourra recourir à des

interventions moins conservatrices comme les techniques de Sauve-Kapandji (mais il faut réséquer largement pour tenir compte de la lésion de la MIO) ou de Darrach.

14.4. Gestes sur la membrane interosseuse

Comme nous l'avons vu plus haut, il y a plusieurs arguments allant à l'encontre d'une cicatrisation spontanée. L'éloignement des berges liée à leur rétraction, et à l'interposition musculaire, pourrait en théorie être corrigé par abord et suture directe [71]. On n'a actuellement pas de recul sur cette technique. Cependant, la consistance de la MIO et l'orientation de ses fibres rendent ces sutures fragiles intrinsèquement et l'on peut craindre que cette réparation ne puisse pas résister correctement à l'importance des contraintes longitudinales en cisaillement. De plus, l'abord direct de la MIO sur sa hauteur nécessiterait une voie d'abord agressive avec un risque neurovasculaire non négligeable sur le nerf interosseux postérieur notamment [102], en plus du risque connu de synostose radio-ulnaire.

Lorsque l'on fait l'analogie entre le genou et l'avant-bras, entre les ligaments croisés et la MIO, le concept de ligamentoplastie de la MIO apparaît évident de la même façon que l'on a développé des techniques de ligamentoplastie du pivot central. La revue de la littérature en 2006 montre que plusieurs auteurs se sont intéressés à ce concept. Une ligamentoplastie de la MIO doit, selon nous, remplir un cahier des charges comprenant les critères suivants :

- premièrement, il faut une technique opératoire précisément définie. Les détails techniques manquent souvent dans la

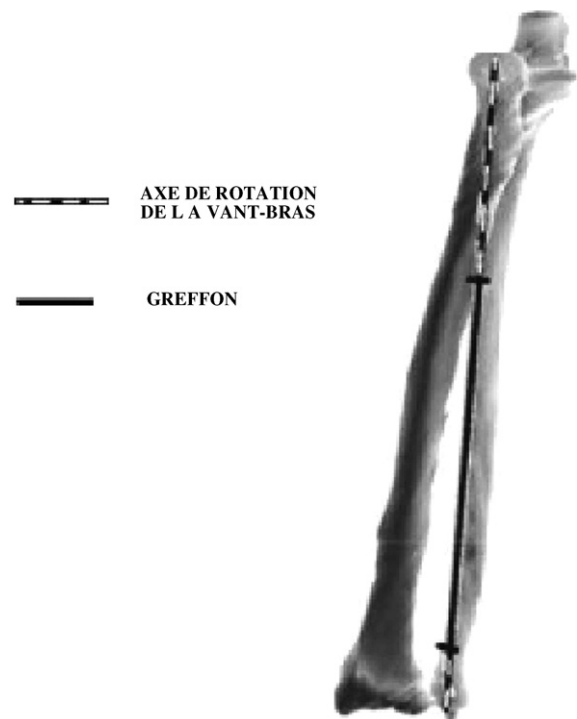


Fig. 18. Concordance de l'axe de pronosupination avec le greffon. Le concept de la ligamentoplastie proposée consiste à calquer le trajet du transplant sur l'axe de rotation de l'avant-bras (schéma et représentation cadavérique).

littérature et nous avons publié notre technique détaillée [97] ;

- deuxièmement, la ligamentoplastie doit compenser la fonction de stabilisation longitudinale de la MIO. Le but n'est pas de reproduire la structure étalée et plane de la MIO, mais de rétablir la fonction principale de la MIO qui est la stabilisation longitudinale et donc la transmission des contraintes verticales [35]. Plusieurs auteurs ont ainsi montré que la réalisation d'une telle ligamentoplastie permettait de

diminuer les contraintes subies par une prothèse de tête radiale implantée dans le cadre d'un syndrome d'Essex-Lopresti [34,94,103] ;

- troisièmement, la ligamentoplastie doit être aussi efficace quelle que soit la position de rotation de l'avant-bras, ce qui signifie que le transplant doit être isométrique en prono-supination. L'isométrie signifie que le transplant est toujours aussi tendu quelle que soit la position de prono-supination et donc que ses points d'insertion

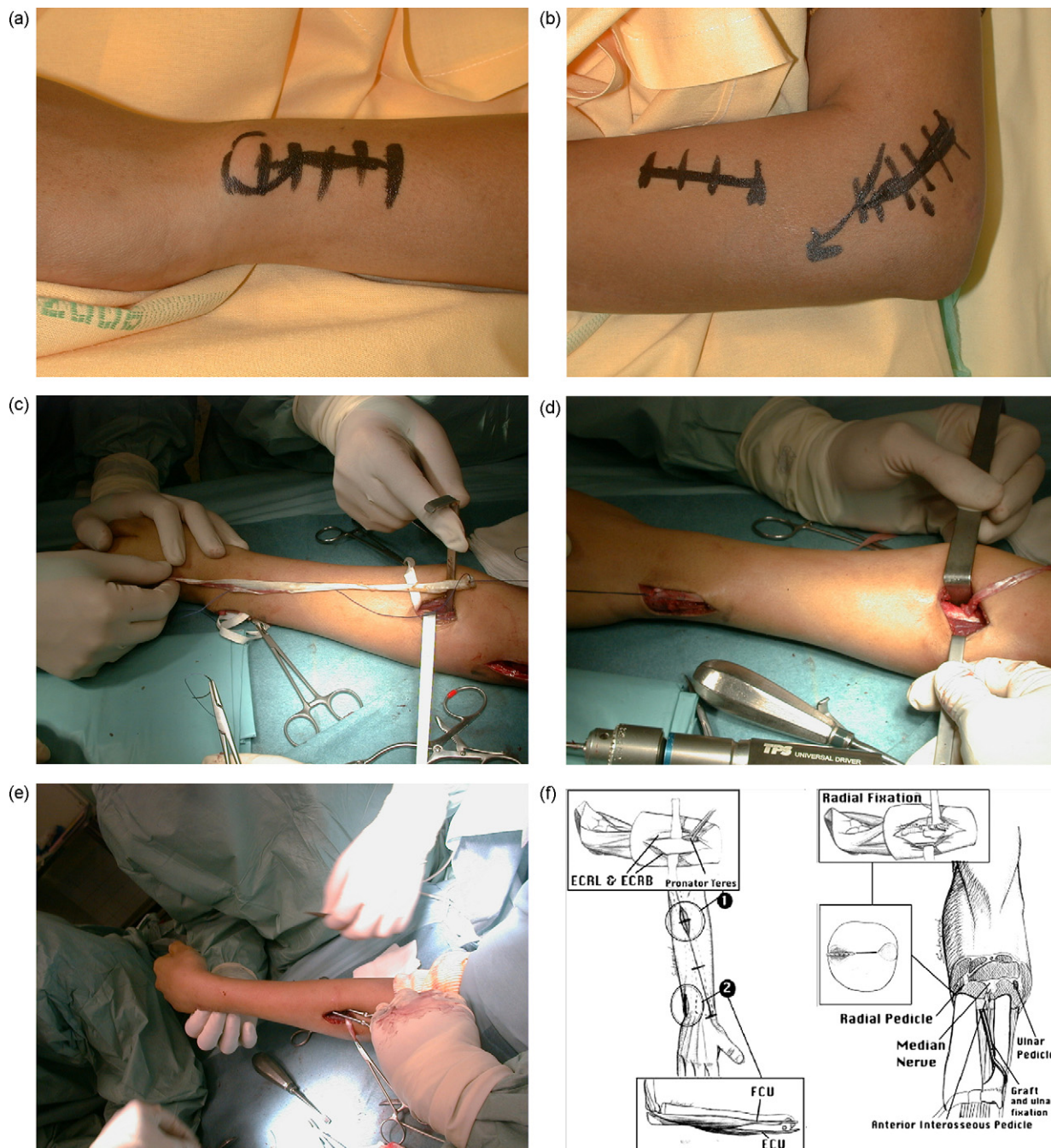


Fig. 19. Technique de la ligamentoplastie de la MIO avec le tendon du muscle semi-membraneux : deux incisions (une proximo-radiale et une disto-ulnaire) sont suffisantes, le transplant étant faufile entre les deux dans le plan de la MIO. Le transplant est fixé en tension sur les versants radial et ulnaire. Aspect peropératoire. Les voies d'abord sont dessinées (Fig. 19 a et b). La longueur du transplant qui doit reproduire l'axe mécanique de l'avant-bras est vérifiée (Fig. 19c), puis le transplant est passé dans ses trajets osseux (Fig. 19d). Après fixation distale, une traction est appliquée pour réduire et stabiliser l'articulation radio-ulnaire moyenne (Fig. 19e). Représentation schématique des principaux temps opératoires (Fig. 19f).

restent à distance égale quelle que soit la rotation de l'avant-bras ;

- quatrième, la ligamentoplastie ne doit pas induire de lésion neurovasculaire lors de sa réalisation ;
- cinquième, la ligamentoplastie ne doit pas perturber la prono-supination. Si durant la prono-supination, les points d'insertions du transplant s'éloignent d'une distance supérieure à la longueur du transplant, ce dernier va se tendre et bloquer la rotation antébrachiale. C'est ce qui se passe dans les cas de prono-supination bloquée, notamment chez les enfants où la MIO est rétractée. Dans ces cas, il est nécessaire de sectionner la MIO pour libérer la prono-supination [47,50] ;
- sixième, le transplant choisi doit être adapté en terme de longueur et de résistance. Certaines études se sont intéressées au choix du transplant utilisé (tendon du *palmaris longus*, *flexor carpi radialis*, tendon patellaire, tendon calcanéen, transplant synthétique) [35,104]. Il en ressort que le transplant se doit d'être suffisamment long et résistant. Un tendon de *palmaris longus*, par exemple, n'est pas assez puissant pour assumer les contraintes longitudinales élevées qui s'exercent physiologiquement dans cette région. Pour la longueur du transplant, il faut prévoir en plus de la distance séparant les points d'insertion, un supplément de longueur pour les portions transosseuses de fixation.

Tous les auteurs ayant travaillé sur le sujet ont raisonné sur un transplant dont le trajet était calqué sur les fibres de la bande centrale de la MIO [35,95]. Ce trajet « anatomique » a pour principal avantage de nécessiter un transplant relativement court car la distance séparant les points d'insertion est alors faible. Cependant, chaque portion de la MIO est plus ou moins tendue selon le degré de rotation de l'avant-bras [20]. Il paraît donc illogique de confier la stabilité longitudinale de l'avant-bras à un seul faisceau qui par définition est condamné à se détendre et donc à être inefficace dans certaines positions. Les solutions théoriques sont alors de réaliser une ligamentoplastie, soit à un seul faisceau isométrique, soit bi- ou multifaisceau où chaque faisceau serait tendu selon le degré de rotation. Ainsi Tomaino propose l'utilisation d'un *flexor carpi radialis* passé en double faisceau [103]. Cependant, la ligne isométrique parfaite est, par définition, représentée par l'axe de rotation de l'avant-bras (Fig. 18). Cet axe relie les centres de rotation des articulations radio-ulnaire proximale (centre de la tête radiale) et distale (styloïde ulnaire) [24,66,67]. Forster et al. ont, d'ailleurs, démontré que plus un transplant a un trajet horizontal, moins il est isométrique [105]. Nous avons donc imaginé une ligamentoplastie dont le trajet serait calqué sur cet axe [97]. Un tel trajet nécessite un transplant plus long que s'il était calqué sur les fibres de la bande centrale de la MIO. Les greffons qui nous sont apparus comme étant les plus à même d'assurer une longueur et une résistance suffisantes étaient représentés par les tendons de la patte d'oie. Ces tendons ont l'avantage supplémentaire d'être très bien connus grâce à leur utilisation importante dans les ligamentoplasties du genou et d'avoir un prélèvement dont la morbidité est très faible. Le transplant est faufilé à travers un tunnel radial et un tunnel ulnaire (Fig. 19). La fixation est assurée par des points

transosseux sur le versant radial et par une suture sur lui-même au versant ulnaire. Les auteurs qui ont travaillé sur le concept de ligamentoplastie ont soulevé la question de la position idéale de mise en tension du transplant. Cette question n'a qu'un intérêt limité car un transplant monofaisceau doit, par définition, être isométrique et donc réglable en tension dans n'importe quelle position. Actuellement, deux patients ont bénéficié de cette technique et aucune iatrogénicité n'a été relevée. Cette technique nécessite encore du recul pour évaluer son efficacité, mais semble prometteuse.

15. Conclusion

La physiologie et la pathologie de la MIO sont indissociables de celles de l'avant-bras. La difficulté d'exploration de la MIO fait que la majorité des travaux qui ont été menés jusqu'à présent étaient des études cadavériques. Maintenant que l'on dispose de meilleures connaissances physiopathologiques ainsi que d'outils performants comme l'échographie, la prochaine étape réside dans le démembrement des différentes associations lésionnelles sur la base d'études cliniques. Toute cette phase diagnostique et de compréhension de cette pathologie prend tout son sens avec les techniques de stabilisation de l'avant-bras et notamment les techniques récentes de ligamentoplastie de la MIO.

Références

- [1] Botte MJ, Gelberman RH. Acute compartment syndrome of the forearm. *Hand Clin* 1998;14(3):391–403.
- [2] Chan PS, Steinberg DR, Pepe MD, Beredjiklian PK. The significance of the three volar spaces in forearm compartment syndrome: a clinical and cadaveric correlation. *J Hand Surg [Am]* 1998;23(6):1077–81.
- [3] Ronel DN, Mtui E, Nolan 3rd WB. Forearm compartment syndrome: anatomical analysis of surgical approaches to the deep space. *Plast Reconstr Surg* 2004;114(3):697–705.
- [4] Sotereanos DG, McCarthy DM, Towers JD, Britton CA, Herndon JH. The pronator quadratus: a distinct forearm space? *J Hand Surg [Am]* 1995;20(3):496–9.
- [5] Gerber A, Masquelet AC. Anatomy and intracompartmental pressure measurement technique of the pronator quadratus compartment. *J Hand Surg [Am]* 2001;26(6):1129–34.
- [6] Curr JF, Coe WA. Dislocation of the inferior radio-ulnar joint. *Br J Surg* 1946;34:74.
- [7] Essex-Lopresti P. Fractures of the radial head with distal radio-ulnar dislocation; report of two cases. *J Bone Joint Surg Br* 1951;33B(2):244–7.
- [8] Skahan 3rd JR, Palmer AK, Werner FW, Fortino MD. The interosseous membrane of the forearm: anatomy and function. *J Hand Surg [Am]* 1997;22(6):981–5.
- [9] McGinley JC, Kozin SH. Interosseous membrane anatomy and functional mechanics. *Clin Orthop Relat Res* 2001;(383):108–22.
- [10] Wright TW. Interosseous membrane of the forearm. *J Am Soc Surg Hand* 2001;1(2):123–34.
- [11] Pfaffle HJ, Tomaino MM, Grewal R, Xu J, Boardman ND, Woo SL, Herndon JH. Tensile properties of the interosseous membrane of the human forearm. *J Orthop Res* 1996;14(5):842–5.
- [12] Shepard MF, Markolf KL, Dunbar AM. The effects of partial and total interosseous membrane transection on load sharing in the cadaver forearm. *J Orthop Res* 2001;19(4):587–92.
- [13] Hotchkiss RN, An KN, Sowa DT, Basta S, Weiland AJ. An anatomic and mechanical study of the interosseous membrane of the forearm: patho-

- mechanics of proximal migration of the radius.. *J Hand Surg [Am]* 1989;14(2 Pt 1):256–61.
- [14] Chandler JW, Stabile KJ, Pfaffle HJ, Li ZM, Woo SL, Tomaino MM. Anatomic parameters for planning of interosseous ligament reconstruction using computer-assisted techniques. *J Hand Surg [Am]* 2003;28(1):111–6.
- [15] Schneiderman G, Meldrum RD, Bloebaum RD, Tarr R, Sarmiento A. The interosseous membrane of the forearm: structure and its role in Galeazzi fractures. *J Trauma* 1993;35(6):879–85.
- [16] McGinley JC, Roach N, Gaughan JP, Kozin SH. Forearm interosseous membrane imaging and anatomy. *Skeletal Radiol* 2004;33(10):561–8.
- [17] McGinley JC, Heller JE, Fertala A, Gaughan JP, Kozin SH. Biochemical composition and histologic structure of the forearm interosseous membrane. *J Hand Surg [Am]* 2003;28(3):503–10.
- [18] McGinley JC, D'Addessi L, Sadeghipour K, Kozin SH. Mechanics of the antibrachial interosseous membrane: response to shearing forces. *J Hand Surg [Am]* 2001;26(4):733–41.
- [19] Werner JA, Koebke J. The function of the antibrachial interosseous membrane. *Anat Embryol (Berl)* 1987;176(1):127–31.
- [20] Gabriel MT, Pfaffle HJ, Stabile KJ, Tomaino MM, Fischer KJ. Passive strain distribution in the interosseous ligament of the forearm: implications for injury reconstruction. *J Hand Surg [Am]* 2004;29(2):293–8.
- [21] Nakamura T, Yabe Y, Horiuchi Y, Yamazaki N. Three-dimensional magnetic resonance imaging of the interosseous membrane of forearm: a new method using fuzzy reasoning. *Magn Reson Imaging* 1999;17(3):463–70.
- [22] Kasten P, Krefft M, Hesselbach J, Weinberg AM. Computer simulation of forearm rotation in angular deformities: a new therapeutic approach. *Injury* 2002;33(9):807–13.
- [23] Kasten P, Krefft M, Hesselbach J, Weinberg AM. How does torsional deformity of the radial shaft influence the rotation of the forearm? A biomechanical study. *J Orthop Trauma* 2003;17(1):57–60.
- [24] Yasutomi T, Nakatsuchi Y, Koike H, Uchiyama S. Mechanism of limitation of pronation–supination of the forearm in geometric models of deformities of the forearm bones.. *Clin Biomech (Bristol Avon)* 2002;17(6):456–63.
- [25] Kihara H, Short WH, Werner FW, Fortino MD, Palmer AK. The stabilizing mechanism of the distal radio–ulnar joint during pronation and supination. *J Hand Surg [Am]* 1995;20(6):930–6.
- [26] Pfaffle HJ, Fischer KJ, Manson TT, Tomaino MM, Woo SL, Herndon JH. Role of the forearm interosseous ligament: is it more than just longitudinal load transfer? *J Hand Surg [Am]* 2000;25(4):683–8.
- [27] Stabile KJ, Pfaffle J, Weiss JA, Fischer K, Tomaino MM. Bidirectional mechanical properties of the human forearm interosseous ligament. *J Orthop Res* 2004;22(3):607–12.
- [28] Manson TT, Pfaffle HJ, Herndon JH, Tomaino MM, Fischer KJ. Forearm rotation alters interosseous ligament strain distribution. *J Hand Surg [Am]* 2000;25(6):1058–63.
- [29] Nakamura T, Yabe Y, Horiuchi Y, Seki T, Yamazaki N. Normal kinematics of the interosseous membrane during forearm pronation–supination — a three-dimensional MRI study. *Hand Surg* 2000;5(1):1–10.
- [30] Nakamura T, Yabe Y, Horiuchi Y. Functional anatomy of the interosseous membrane of the forearm — dynamic changes during rotation. *Hand Surg* 1999;4(1):67–73.
- [31] Nakamura T, Yabe Y, Horiuchi Y. In vivo MR studies of dynamic changes in the interosseous membrane of the forearm during rotation. *J Hand Surg [Br]* 1999;24(2):245–8.
- [32] Skahan 3rd JR, Palmer AK, Werner FW, Fortino MD. Reconstruction of the interosseous membrane of the forearm in cadavers. *J Hand Surg [Am]* 1997;22(6):986–94.
- [33] Shaaban H, Giakas G, Bolton M, Williams R, Wicks P, Scheker LR, Lees VC. The load-bearing characteristics of the forearm: pattern of axial and bending force transmitted through ulna and radius. *J Hand Surg [Br]* 2006;31(3):274–9.
- [34] Pfaffle HJ, Stabile KJ, Li ZM, Tomaino MM. Reconstruction of the interosseous ligament unloads metallic radial head arthroplasty and the distal ulna in cadavers. *J Hand Surg [Am]* 2006;31(2):269–78.
- [35] Tejwani SG, Markolf KL, Benhaim P. Reconstruction of the interosseous membrane of the forearm with a graft substitute: a cadaveric study. *J Hand Surg [Am]* 2005;30(2):326–34.
- [36] Pfaffle HJ, Fischer KJ, Manson TT, Tomaino MM, Herndon JH, Woo SL. A new methodology to measure load transfer through the forearm using multiple universal force sensors. *J Biomech* 1999;32(12):1331–5.
- [37] Shaaban H, Giakas G, Bolton M, Williams R, Scheker LR, Lees VC. The distal radio–ulnar joint as a load-bearing mechanism — a biomechanical study. *J Hand Surg [Am]* 2004;29(1):85–95.
- [38] Markolf KL, Lamey D, Yang S, Meals R, Hotchkiss R. Radio–ulnar load-sharing in the forearm. A study in cadavera. *J Bone Joint Surg Am* 1998;80(6):879–88.
- [39] Miura T, Firoozbaksh K, Cheema T, Moneim MS, Edmunds M, Meltzer S. Dynamic effects of joint-leveling procedure on pressure at the distal radio–ulnar joint. *J Hand Surg [Am]* 2005;30(4):711–8.
- [40] DeFrate LE, Li G, Zayontz SJ, Herndon JH. A minimally invasive method for the determination of force in the interosseous ligament.. *Clin Biomech (Bristol Avon)* 2001;16(10):895–900.
- [41] Markolf KL, Dunbar AM, Hannani K. Mechanisms of load transfer in the cadaver forearm: role of the interosseous membrane. *J Hand Surg [Am]* 2000;25(4):674–82.
- [42] Rabinowitz RS, Light TR, Havey RM, Gourineni P, Patwardhan AG, Sartori MJ, Vrbos L. The role of the interosseous membrane and triangular fibrocartilage complex in forearm stability. *J Hand Surg [Am]* 1994;19(3):385–93.
- [43] Birkbeck DP, Failla JM, Hoshaw SJ, Fyhrrie DP, Schaffler M. The interosseous membrane affects load distribution in the forearm. *J Hand Surg [Am]* 1997;22(6):975–80.
- [44] Kaufmann RA, Kozin SH, Barnes A, Kalluri P. Changes in strain distribution along the radius and ulna with loading and interosseous membrane section. *J Hand Surg [Am]* 2002;27(1):93–7.
- [45] Kapandji A. L'unité radio–cubitale. Son importance fonctionnelle dans les fractures des deux os de l'avant-bras. [The radio–ulnar unit. Its functional importance in fractures of both bones of the forearm]. *Chir Main* 1998;17(4):348–61.
- [46] Hagert CG. The distal radio–ulnar joint in relation to the whole forearm. *Clin Orthop Relat Res* 1992;(275):56–64.
- [47] Ozkan T, Aydin A, Ozer K, Ozturk K, Durmaz H, Ozkan S. A surgical technique for pediatric forearm pronation: brachioradialis rerouting with interosseous membrane release. *J Hand Surg [Am]* 2004;29(1):22–7.
- [48] Seringe R, Dubousset JF. L'attitude en supination de l'avant-bras par paralysie chez l'enfant. Traitement chirurgical à propos de 19 cas. [Attitude of the paralytic supination of the forearm in children. Surgical treatment in 19 cases]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 1977;63(7):687–99.
- [49] Hirayama T, Takemitsu Y, Yagihara K, Mikita A. Operation for chronic dislocation of the radial head in children. Reduction by osteotomy of the ulna. *J Bone Joint Surg Br* 1987;69(4):639–42.
- [50] Lipskeir E, Weizenbluth M. Derotation osteotomy of the forearm in management of paralytic supination deformity. *J Hand Surg [Am]* 1993;18(6):1069–74.
- [51] DiBenedetto MR, Lubbers LM, Coleman CR. Long-term results of the minimal resection Darrach procedure. *J Hand Surg [Am]* 1991;16(3):445–50.
- [52] Janssen RP, Vegter J. Resection of the radial head after Mason type-III fractures of the elbow: follow-up at 16 to 30 years. *J Bone Joint Surg Br* 1998;80(2):231–3.
- [53] Fuchs S, Chylarecki C. Do functional deficits result from radial head resection? *J Shoulder Elbow Surg* 1999;8(3):247–51.
- [54] Morrey BF, Askew LJ, Chao EY. A biomechanical study of normal functional elbow motion. *J Bone Joint Surg Am* 1981;63A:872–7.
- [55] Sowa DT, Hotchkiss RN, Weiland AJ. Symptomatic proximal translation of the radius following radial head resection. *Clin Orthop Relat Res* 1995;(317):106–13.
- [56] Watanabe H, Berger RA, Berglund LJ, Zobitz ME, An KN. Contribution of the interosseous membrane to distal radio–ulnar joint constraint. *J Hand Surg [Am]* 2005;30(6):1164–71.

- [57] Ward LD, Ambrose CG, Masson MV, Levaro F. The role of the distal radio-ulnar ligaments, interosseous membrane, and joint capsule in distal radio-ulnar joint stability. *J Hand Surg [Am]* 2000;25(2):341–51.
- [58] Gabl M, Zimmermann R, Angermann P, Sekora P, Maurer H, Steinlechner M, Pechlaner S. The interosseous membrane and its influence on the distal radio-ulnar joint. An anatomical investigation of the distal tract. *J Hand Surg [Br]* 1998;23(2):179–82.
- [59] Gofton WT, Gordon KD, Dunning CE, Johnson JA, King GJ. Soft-tissue stabilizers of the distal radio-ulnar joint: an in vitro kinematic study. *J Hand Surg [Am]* 2004;29(3):423–31.
- [60] Leung YF, Ip SP, Ip WY, Kam WL, Wai YL. The crisscross injury mechanism in forearm injuries. *Arch Orthop Trauma Surg* 2005;125(5):298–303.
- [61] Poitevin LA. Anatomy and biomechanics of the interosseous membrane: its importance in the longitudinal stability of the forearm. *Hand Clin* 2001;17(1):97–110. vii.
- [62] Harrison JW, Siddique I, Powell ES, Shaaban H, Stanley JK. Does the orientation of the distal radio-ulnar joint influence the force in the joint and the tension in the interosseous membrane? *Clin Biomech (Bristol Avon)* 2005;20(1):57–62.
- [63] Shang TY, Gu YW, Dong FH. Treatment of forearm bone fractures by an integrated method of traditional chinese and western medicine. *Clin Orthop Relat Res* 1987;(215):56–64.
- [64] Werner FW, An KN. Biomechanics of the elbow and forearm. *Hand Clin* 1994;10(3):357–73.
- [65] Kasten P, Krefft M, Hesselbach J, Weinberg AM. Kinematics of the ulna during pronation and supination in a cadaver study: implications for elbow arthroplasty. *Clin Biomech (Bristol Avon)* 2004;19(1):31–5.
- [66] Hollister AM, Gellman H, Waters RL. The relationship of the interosseous membrane to the axis of rotation of the forearm. *Clin Orthop Relat Res* 1994;(298):272–6.
- [67] Tang P, Failla JM, Contesti LA. The radio-ulnar joints and forearm axis: surgeons' perspective. *J Hand Ther* 1999;12(2):75–84.
- [68] Murray PM. Diagnosis and treatment of longitudinal instability of the forearm. *Tech Hand Up Extrem Surg* 2005;9(1):29–34.
- [69] McGinley JC, Roach N, Hopgood BC, Limmer K, Kozin SH. Forearm interosseous membrane trauma: MRI diagnostic criteria and injury patterns. *Skeletal Radiol* 2006;35(5):275–81.
- [70] McGinley JC, Hopgood BC, Gaughan JP, Sadeghipour K, Kozin SH. Forearm and elbow injury: the influence of rotational position. *J Bone Joint Surg Am* 2003;85-A(12):2403–9.
- [71] Failla JM, Jacobson J, van Holsbeeck M. Ultrasound diagnosis and surgical pathology of the torn interosseous membrane in forearm fractures/dislocations. *J Hand Surg [Am]* 1999;24(2):257–66.
- [72] Gabrion A, Havet E, Bellot F, Tranvan F, Merti P, de Lestang M. Recent fractures of the radial head associated with elbow instability treated with floating Judet prosthesis. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 2005;91(5):407–14.
- [73] Itamura J, Roidis N, Mirzayan R, Vaishnav S, Learch T, Shean C. Radial head fractures: MRI evaluation of associated injuries. *J Shoulder Elbow Surg* 2005;14(4):421–4.
- [74] Schuind F, Alemzadeh S, Stallenberg B, Burny F. Does the normal contralateral wrist provide the best reference for X-ray film measurements of the pathologic wrist? *J Hand Surg [Am]* 1996;21(1):24–30.
- [75] Evans EM. Pronation injuries of the forearm. With special reference to the anterior Monteggia fracture. *J Bone Joint Surg Br* 1949;31B(4):578–88.
- [76] Auyeung J, Broome G. The Essex-Lopresti lesion: a variant with a bony distal radio-ulnar joint injury. *J Hand Surg [Br]* 2006;31(2):206–7.
- [77] Trousdale RT, Amadio PC, Cooney WP, Morrey BF. Radio-ulnar dissociation. A review of 20 cases. *J Bone Joint Surg Am* 1992;74(10):1486–97.
- [78] Edwards GJ, Jupiter JB. Radial head fractures with acute distal radio-ulnar dislocation. *Clin Orthop Relat Res* 1988;234:61–9.
- [79] Daecle W, Martini AK. Die Sekundärversorgung nach übersehener Essex-Lopresti Verletzung [Secondary treatment for undetected Essex-Lopresti lesion]. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 2004;142(2):235–40.
- [80] Wallace AL, Walsh WR, van Rooijen M, Hughes JS, Sonnabend DH. The interosseous membrane in radio-ulnar dissociation. *J Bone Joint Surg Br* 1997;79(3):422–7.
- [81] Smith AM, Urbanosky LR, Castle JA, Rushing JT, Ruch DS. Radius pull test: predictor of longitudinal forearm instability. *J Bone Joint Surg Am* 2002;84-A(11):1970–6.
- [82] Wallace AL. Magnetic resonance imaging or ultrasound in assessment of the interosseous membrane of the forearm. *J Bone Joint Surg Am* 2002;84-A(3):496–7.
- [83] Starch DW, Dabezies EJ. Magnetic resonance imaging of the interosseous membrane of the forearm. *J Bone Joint Surg Am* 2001;83-A(2):235–8.
- [84] Matsuoka J, Beppu M, Nakajima H, Aoki H. Ultrasonography for the interosseous membrane of the forearm. *Hand Surg* 2003;8(2):227–35.
- [85] Jaakkola JI, Riggans DH, Lourie GM, Lang CJ, El Hassan B, Rosenthal SJ. Ultrasonography for the evaluation of forearm interosseous membrane disruption in a cadaver model. *J Hand Surg [Am]* 2001;26(6):1053–7.
- [86] Soubeyrand M, Lafont C, Oberlin C, France W, Maulat I, Degeorges R. The “muscular hernia sign”: an original ultrasonographic sign to detect lesions of the forearm's interosseous membrane. *Surg Radiol Anat* 2006;28(3):372–8.
- [87] Bessy H, Leemrijse T, Cadot B, Touam C, Oberlin C. Reconstruction des pertes de substance de l'avant-bras par cubitalisation du radius (one bone forearm). À propos de six cas. [Reconstruction of the loss of bone substance of the forearm by cubitalization of the radius (one bone forearm). Apropos of six cases]. *Ann Chir Main Memb Super* 1996;15(4):199–211.
- [88] Kihara H, Palmer AK, Werner FW, Short WH, Fortino MD. The effect of dorsally angulated distal radius fractures on distal radio-ulnar joint congruency and forearm rotation. *J Hand Surg [Am]* 1996;21(1):40–7.
- [89] Hotchkiss RN. Displaced fractures of the radial head: internal fixation or excision? *J Am Acad Orthop Surg* 1997;5(1):1–10.
- [90] Hotchkiss RN. Fractures of the radial head and related instability and contracture of the forearm. *Instr Course Lect* 1998;47:173–7.
- [91] Judet T, Garreau de Loubresse C, Piriou P, Charnley G. A floating prosthesis for radial-head fractures. *J Bone Joint Surg Br* 1996;78(2):244–9.
- [92] Judet T, Massin P, Bayeh PJ. Prothèse de tête radiale à cupule flottante dans les traumatismes récents et anciens du coude. Résultats préliminaires. [Radial head prosthesis with floating cup in recent and old injuries of the elbow: preliminary results]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 1994;80(2):123–30.
- [93] Markolf KL, Tejwani SG, O'Neil G, Benhaim P. Load-sharing at the wrist following radial head replacement with a metal implant. A cadaveric study. *J Bone Joint Surg Am* 2004;86-A(5):1023–30.
- [94] Tejwani SG, Markolf KL, Benhaim P. Graft reconstruction of the interosseous membrane in conjunction with metallic radial head replacement: a cadaveric study. *J Hand Surg [Am]* 2005;30(2):335–42.
- [95] Tomaino MM, Pfaffle J, Stabile K, Li ZM. Reconstruction of the interosseous ligament of the forearm reduces load on the radial head in cadavers. *J Hand Surg [Br]* 2003;28(3):267–70.
- [96] Brinkman JM, Rahusen FT, de Vos MJ, Eygendaal D. Treatment of sequelae of radial head fractures with a bipolar radial head prosthesis: good outcome after one to four years follow-up in 11 patients. *Acta Orthop* 2005;76(6):867–72.
- [97] Soubeyrand M, Oberlin C, Dumontier C, Belkheyar Z, Lafont C, Degeorges R. Ligamentoplasty of the forearm interosseous membrane using the semi-tendinosus tendon: anatomical study and surgical procedure. *Surg Radiol Anat* 2006;28(3):300–7.
- [98] Shih JT, Lee HM. Functional results post-triangular fibrocartilage complex reconstruction with extensor carpi ulnaris with or without ulnar shortening in chronic distal radio-ulnar joint instability. *Hand Surg* 2005;10(2–3):169–76.
- [99] Martineau PA, Bergeron S, Beckman L, Steffen T, Harvey EJ. Reconstructive procedure for unstable radial-sided triangular fibrocartilage complex avulsions. *J Hand Surg [Am]* 2005;30(4):727–32.

- [100] Nishiwaki M, Nakamura T, Nakao Y, Nagura T, Toyama Y. Ulnar shortening effect on distal radio–ulnar joint stability: a biomechanical study. *J Hand Surg [Am]* 2005;30(4):719–26.
- [101] Saffar P. Ulna oblique osteotomy for radius and ulna length inequality: technique and applications. *Tech Hand Up Extrem Surg* 2006;10(1):47–53.
- [102] Jin F, Skie M, Ebraheim NA, Lu J. Anatomic basis of dorsoradial approach for radio–ulnar synostosis. *Surg Radiol Anat* 1998;20(4):239–42.
- [103] Pfaeffle HJ, Stabile KJ, Li ZM, Tomaino MM. Reconstruction of the interosseous ligament restores normal forearm compressive load transfer in cadavers. *J Hand Surg [Am]* 2005;30(2):319–25.
- [104] Stabile KJ, Pfaeffle J, Saris I, Li ZM, Tomaino MM. Structural properties of reconstruction constructs for the interosseous ligament of the forearm. *J Hand Surg [Am]* 2005;30(2):312–8.
- [105] Forster RI, Sharkey NA, Szabo RM. Forearm interosseous ligament isometry. *J Hand Surg [Am]* 1999;24(3):538–45.